ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024.

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Π. ΚΟΥΜΠΟΥΛΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Π. ΚΟΥΜΠΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26η Σεπτεμβρίου 2024.

Αντώνιος Αντωνόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής

Е.М.П.

Αντώνιος Κλαδάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024.

.....

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Π. ΚΟΥΜΠΟΥΛΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Π. ΚΟΥΜΠΟΥΛΗΣ, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η συνεχής πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος, που καθοδηγείται από παγκόσμιες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιταγές, έχει εισαγάγει νέες τοπολογίες μετατροπέων και τεχνολογίες ημιαγωγών με στόχο την αύξηση της πυκνότητας ισχύος και τη μείωση του κόστους. Ειδικότερα, η δημοφιλία νέων τεχνολογιών ημιαγωγών όπως το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και το αζωτούχο γάλλιο (GaN), οδήγησε στην υλοποίηση νέων μετατροπέων και τη βελτίωση των υπαρχόντων, προσφέροντας υψηλότερη απόδοση, υψηλότερες συχνότητες μεταγωγής και ανώτερη θερμική απόδοση σε σύγκριση με την δοκιμασμένη τεχνολογία πυριτίου (Si). Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός θερμιδομετρικού συστήματος για τη μέτρηση των απωλειών σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος υψηλής απόδοσης. Οι απώλειες ισχύος σε τέτοια συστήματα επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική απόδοση και λειτουργία τους και η ακριβής μέτρησή τους είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και τη διασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας, όπως σε εφαρμογές κινητήριων συστημάτων. Η προτεινόμενη θερμιδομετρική διάταξη χρησιμοποιεί διάταξη διπλού κελύφους κλειστού τύπου, με το νερό ως ψυκτικό μέσο. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει θερμική απομόνωση και ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις στη λειτουργία της από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η εργασία επιπρόσθετα καλύπτει όχι μόνο το σχεδιασμό αλλά και την ανάπτυξη κυκλωμάτων ελέγχου και ενός συστήματος συλλογής δεδομένων για τη μέτρηση και επεξεργασία των μεγεθών που σχετίζονται με την εξαγωγή των απωλειών ισγύος. Η θερμιδομετρική διάταξη της εργασίας και εν γένει οι θερμιδομετρικές διατάξεις συγκρίνονται με συμβατικές ηλεκτρικές μεθόδους, όπως οι ψηφιακοί αναλυτές ισχύος, όπου προκύπτει η υψηλότερη ακρίβειά της μεθόδου σε μετατροπείς υψηλής απόδοσης όπου οι ηλεκτρικές μέθοδοι υστερούν. Πραγματοποιείται βαθμονόμηση του συστήματος, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση των απωλειών σε διάφορες συνθήκες δοκιμών. Μέσω της ανάπτυξης αυτού του θερμιδομετρικού συστήματος, η παρούσα εργασία συμβάλλει στην προσπάθεια θεμελίωσης των τεχνικών μέτρησης απωλειών για τις εργαστηριακές και βιομηγανικές εφαρμογές, επιτρέποντας την ακριβέστερη μοντελοποίηση και τον χαρακτηρισμό των σύγχρονων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισγύος.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρονικά ισχύος - Μέτρηση απωλειών - Θερμιδομετρική διάταξη - Υπολογισμός απωλειών ισχύος - Διάταξη διπλού κελύφους - Προγραμματισμός μικροεπεξεργαστή - Θερμική προσομοίωση - Αναλυτικός υπολογισμός απωλειών - Απώλειες - C - Python - MOSFET - SiC - GaN -Ημιαγωγοί - Πειραματικός προσδιορισμός - Βαθμονόμηση - Κατασκευή - Αισθητήρες - Θερμοκρασία - Ροής - Διάταξη Peltier - Εναλλαγή θερμότητας - Έλεγχος θερμοκρασίας - Έλεγχος ροής - Μετατροπέας υποβιβασμού.

Abstract

Continuous advances in power electronics, driven by global economic, social and environmental imperatives, have introduced new converter topologies and semiconductor technologies to increase power density and reduce costs. In particular, the popularity of new semiconductor technologies such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) has led to the implementation of new converters and improvement of existing ones, offering higher efficiency, higher switching frequencies and superior thermal performance compared to proven silicon (Si) technology. This thesis focuses on the design and implementation of a calorimetric system for loss measurement in high efficiency power electronics converters. Power losses in such systems significantly affect their overall performance and operation, and their accurate measurement is crucial for optimizing the design and ensuring reliable operation, such as in drive system applications. The proposed calorimetric device uses a closed-type double-shell arrangement with water as the coolant. This device provides thermal isolation and minimizes variations in operation from environmental factors. The work additionally covers not only the design but also the development of control circuits and a data acquisition system for measuring and processing the quantities related to the extraction of power losses. The thermodometric device of the work and in general the thermodometric devices are compared with conventional electrical methods, such as digital power analyzers, where the higher accuracy of the method is shown in high efficiency converters where electrical methods fall short. System calibration is performed, ensuring high accuracy in measuring losses under various test conditions. Through the development of this calorimetric system, this work contributes to the effort of laying the foundation for loss measurement techniques for laboratory and industrial applications, allowing more accurate modeling and characterization of modern power electronic converters.

Keywords

Power electronics - Loss measurement - Calorimetric device - Power loss calculation - Doublejacket device - Microprocessor programming - Thermal simulation - Analytical loss calculation - Loss - C - Python - MOSFET - SiC - GaN - Semiconductors - Experimental determination - Calibration - Fabrication - Sensors - Temperature - Flow - Peltier device - Heat switching -Temperature control - Flow control - Step-down converter.

Ευχαριστίες

Η σχεδίαση και προσαρμογή μιας μετρητικής διάταξης αν και επίπονη, χρονοβόρα και με αβέβαια τελικά αποτελέσματα δίνει την απαραίτητη εικόνα για τις δυσκολίες που ενέχει η κατασκευή ενός συστήματος από το μηδέν αλλά και προσφέρει όπως και απαιτεί την πλήρη κατανόηση της διάταξης και του τρόπου λειτουργίας της για την ολοκλήρωση της. Όπως καθίσταται προφανές η επίτευξη του εγγειρήματος της εργασίας αυτής βασίζεται στη διάθεση γρόνου, γνώσεων και τεγνικών δεξιοτήτων παραπάνω του ενός ατόμου και σε διαφορετικό βαθμό. Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας Αντώνη Αντωνόπουλο, για τη συνεργασία και την αρωγή του σε πολύ σημαντικά θέματα που προέκυψαν ιδιαίτερα στη φάση της υλοποίησης και των δοκιμών της εργασίας. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Ζάννη για την αμέριστη βοήθεια του και το ακόρεστο ενδιαφέρον σε οποιοδήποτε τεχνικό πρόβλημα ανέκυπτε. Ακόμα η συμβολή των συμφοιτητών μου και των μελών του εργαστηρίου σε όλη τη μακρά διάρκεια αυτής της εργασίας βοήθησε στην επίλυση των προβληματισμών αλλά και στην διαπίστωση θεμελιωδών προβληματισμών που υπάρχουν στα σπάργανα της δημιουργίας διατάξεων και συσκευών. Τέλος θα ήθελα να επισημάνω τη συνεισφορά του πατέρα μου, με την ιδιότητα του ψυκτικού, στην κατασκευή του κυκλώματος ψύξης και κυκλοφορίας του νερού καθώς και των κελυφών, η οποία ήταν πολύτιμη και θεμέλιος λίθος της ανάπτυξης της διπλωματικής. Ευχαριστώ του γονείς μου και τον κοινωνικό μου περίγυρο που με ανέχθηκε και με υποστήριξε ποικιλοτρόπως στη μακρά διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

Ιψη	i
ct	ii
στίες	iii
αγωγή Σκοπός	1 2 2 2
τρηση απωλειών Γενικά	3 3 3 3 4 4 5
)μιδομετρική μέθοδος Αρχή λειτουργίας	6 7 8 11 11
χανισμός απωλειών ισχύος Χαρακτηρισμός απωλειών	12 12 13 14 14 14 16
Οκαταρτική σχεδίαση Μετάδοση θερμότητας 5.1.1 Αγωγή 5.1.2 Συναγωγή 5.1.3 Ακτινοβολία Θερμικά κυκλώματα RC	 18 18 19 20 21 22 22 23 24 26 28 29 29
	γγη ct σστίες ματοτή Σκοπός Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας. Περίγραμμα της εργασίας. τρηση απολειόν Γενικά Μάθοδοι μέτρησης απολειόν Ηλεκτρικές μετρήσεις με τη χρήση αναλογικών οργάνων 2.3.1 Ηλεκτρικές μετρήσεις με τη χρήση αναλογικών οργάνων 2.3.2 Αβεβαιότητα μετρήσεων 2.3.4 Αβεβαιότητα μετρήσεων ρμιδομετρική μέθοδος Αχή λειτουργίας Τυπικές θερμιδομετρικός διατάξεως Μάθοδος μεταβατικής κατάστασης Σύγκριση θερμιδομετρικώς διατάξεων γανισμός απολειών υσχόος Χαρακτηρισμός απολειών 4.1.1 Απώδαση προς την αγωγή (switch on): 4.1.2 Αικάβαση προς την αγωγή (switch off): Προσομαίωση του μοντέλου απολειών 4.1.3 Μετάδοση θερμύτητας 5.1.1 Αγωγή 5.1.2 Συωγογή του θερμιδομετρικής διάταξης Γιειλογή τύπου θερμιδομετρικής διάταξης

	5.8	Έλεγχος και δειγματοληψία	30
6	Πειρ	αματικά αποτελέσματα	32
	6.1	Διαδικασία βαθμονόμησης	32
	6.2	Αποτελέσματα βαθμονόμησης	32
	6.3	Επεξεργασία των μετρήσεων	32
	6.4	Δοκιμές 20W	32
	6.5	Δοκιμή 28.2W	35
	6.6	Δοκιμή 30.62W	35
	6.7	Δοκιμές 40.4W	36
	6.8	Δοκιμή 45W	39
	6.9	Δοκιμή 55W - 1Φ αντίσταση	40
	6.10	Δοκιμή 50.28W	41
	6.11	Κατανομή δοκιμών	42
	6.12	Συνάοτηση βαθμονόμησης	42
	6.13	Ευρετήριο δοκιμών	43
7	Επίλ	ογος	45
	7.1	Συμπεράσματα	45
	7.2	Προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη της διάταξης	45

Κατάλογος σχημάτων

 2 Μετρητική διάταξη με χρήση ψηφιακών μετρήσεων [?]	4
3 Αβεβαιότητα μετοήσεων στην μησιακή μέθοδο	6
σ προρωσιητα μοιρησοών στην ψηψιακή μουσου	0
4 Θερμιδομετρικές διατάξεις	8
5 Σύγκριση διατάξεων κλειστού και ανοιχτού τύπου [?]	10
6 Δομή SiC MOSFET, [?]	13
7 Δομή GaN, [?]	13
8 Κανάλι αγωγής MOSFET, [?]	13
9 Κυκλωματικό μοντέλο MOSFET με τα παρασιτικά του στοιχεία, [?]	14
10 Χαρακτηριστικές διακοπής MOSFET ημιγέφυρας με επαγωγικό φορτίο, [?]	15
11 Απώλειες διακόπτη ισχύος MOSFET	17
12 Θερμοκρασίες διακόπτη στην επαφή και στο κέλυφος	17
13 Απεικόνιση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας σε έναν ημιαγωγό	18
14 Μεταφορά θερμότητας : αγωγή [?]	19
15 Μεταφορά θερμότητας : συναγωγή[?]	20
16 Μεταφορά θερμότητας : ακτινοβολία [?]	21
17 Θερμικό κύκλωμα RC τύπου Τ	21
18 Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου	23
19 Συνοπτική απεικόνιση συστήματος	24
20 Φωτογραφία της διάταξης κατά την κατασκευή	25
21 Προτεινόμενο θερμικό κυκλωματικό ισοδύναμο της διάταξης.	25
22 Θερμική προσομοίωση της συσκευής σε μεταβατική κατάσταση	26
23 Θερμική προσομοίωση της συσκευής σε μόνιμη κατάσταση	27
24 Κύκλωμα triac	27
25 Τυπωμένο κύκλωμα	27
26 Θερμοκρασίες : Εσωτερική, Διακένου, Εξωτερική	28
27 Χαρακτηριστικές διαφοράς θερμοκρασίας προσαγωγής - επιστροφής και ροής	29
28 Κύκλωμα διαμόρφωσης θερμοκρασίας	30
29 Κύκλωμα με τον επεξεργαστή	31
30 Τυπωμένο κύκλωμα ελεγκτή της θερμιδομετρικής διάταξης	31
31 Ζεύγος δοκιμών ισχύς εισόδου 20W	34
32 Δοκιμή 28.28W	35
33 Δοκιμή βαθμονόμησης στα 30.62W	36
34 Ζεύγος δοκιμών σε όμορη ή ίδια τιμή ισχύος εισόδου	38
35 Δοκιμή βαθμονόμησης στα 45W	39
36 Δοκιμή βαθμονόμησης στα 55W	40
37 Δοκιμή βαθμονόμησης στα 50.28W	41
38 Απεικόνιση πλήθους δοκιμών και σύγκριση μετρούμενης και εγγεόμενης ισγύος	42
39 Απεικόνιση μετρούμενης και εγχεόμενης ισχύος.	43

Κατάλογος πινάκων

1	Σύγκριση Ανοιχτού και Κλειστού Τύπου Συστημάτων	9
2	Σύγκριση Si,SiC,GaN [?]	12
3	Επιφάνεια, Όγκος και θεωρητικά θερμικά χαρακτηριστικά	26
4	Λίστα δοκιμών βαθμονόμησης	44

1 Εισαγωγή

Η επικρατούσα τάση στα ηλεκτρονικά ισχύος όπως αυτή επαληθεύεται από τις νέες τοπολογίες διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ημιαγωγικών στοιχείων και υλικών, αποσκοπεί στη μείωση του κόστους και της αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Η διαρκής αυτή εξέλιξη του τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, πηγάζει από τις οικονομικές , κοινωνικές και κλιματικές επιταγές παγκοσμίως. Ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών και η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε τοπικά είτε αποκεντρωμένα, συνιστούν μερικές από τις κρίσιμες εφαρμογές στις οποίες τα ηλεκτρονικά ισχύος καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό των επιμέρους συστημάτων [?]. Οι μετατροπείς αυτοί, μέρη των παραπάνω συστημάτων απαιτείται να έχουν υψηλή απόδοση και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Οι νέες τεχνολογίες ημιαγωγών SiC (καρβδίδιο του πυριτίου) και GaN (νιτρίδιο του γαλλίου) ικανοποιούν τα παραπάνω σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι η υπάρχουσα τεχνολογία Si (πυριτίου). Τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή μικρότερη αντίσταση αγωγής, μεγαλύτερη τάση διάσπασης, η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και οι χαμηλότερες διακοπτικές απώλειες [?], οδηγούν ήδη στην αντικατάσταση πλήθους διατάξεων με Si MOSFET από SiC MOSFET και GaN [?]. Η μικρότερη αντίσταση αγωγής, η υψηλότερη τάση διάσπασης και οι βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις για την ίδια ισχύ εξόδου ενώ επιτρέπουν και την αύξηση της ισχύος εξόδου, αφού οι νέοι ημιαγωγοί μπορούν να διαχειριστούν υψηλότερη ένταση, τάση και θερμοκρασία λειτουργίας και να διατηρήσουν υψηλή απόδοση συγκριτικά με ένα μετατροπέα από MOSFET πυριτίου.



(α') Si,SiC,GaN σύγκριση χαρακτηριστικών [?]

(β') Si,SiC,GaN σύγκριση χαρακτηριστικών [?]

Σχήμα 1: Comparison of Si, SiC, and GaN characteristics.

Σύμφωνα και με τα παραπάνω επομένως η εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών επιτρέπει στους σχεδιαστές την αύξηση την πυκνότητας ισχύος κυρίως μέσω της αύξηση της διακοπτικής συχνότητας οδηγεί σε μικρότερα μεγέθη μετασχηματιστών και πηνίων καθώς και των παθητικών στοιχείων (πυκνωτών) που χρησιμοποιούνται είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο των μετατροπέων ως φίλτρα [?] [?]. Ωστόσο η υψηλή διακοπτική συχνότητα δημιουργεί και παρασιτικά σε αυτή την επαύξηση της ισχύος φαινόμενα, όπως τα επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας, απώλειες υστέρησης και απώλειες λόγω δινορευμάτων. Εν γένει οι απώλειες αυτές είναι δύσκολο να μετρηθούν και να μοντελοποιηθούν. Η υψηλά σχεδιασμένη απόδοση των μετατροπέων, η φύση των απωλειών και οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου με το πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο και τα ταχύτατα μεταβατικά φαινόμενα αλλαγής κατάστασης του ημιαγωγού δυσχεραίνουν τη μέτρηση των απωλειών με τη χρήση αναλυτή ενέργεια ή της δο-κιμής διπλού παλμού (double pulse test),από την άποψη της ακρίβειας και του εύρους των τιμών [?]. Η αδυναμία εξαγωγής των απωλειών με ακρίβεια μέσω των ηλεκτρικών μεγεθών της μετρούμενης διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος,έχει δειχθεί ότι μπορεί να ξεπεραστεί με την εφαρμογή της θεριμδομετρικής μεθόδου για τη μέτρηση των απωλειών της διάταξης καθώς και τον επιμέρους

διαχωρισμό αυτών.

1.1 Σκοπός

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας θερμιδομετρικής διάταξης κλειστού τύπου διπλού κλωβού με ψυκτικό μέσο το νερό και του κυκλώματος δειγματοληψίας και επεξεργασίας των μετρούμενων ποσοτήτων. Επιπλέον η προσαρμογή του κυκλώματος ψύξης και θέρμανσης όπου αυτό απαιτείται και ο έλεγχος αυτού. Τελικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διαπίστωση πως με ιδία κατασκευή μπορεί να επιτευχθεί η υποστηριζόμενη από τη βιβλιογραφία ακρίβεια μέτρησης, για εύρος τιμών ισχύος από 15W έως 60W σε αυτή την θερμιδομετρική διάταξη και η παροχή της συσκευής βαθμονομημένη για την εξαγωγή απωλειών με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος

1.2 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας

- Διερεύνηση και ανάπτυξη της θερμιδομετρικής διάταξης, με δύο κλειστά κυκλώματα έλεγχου θερμοκρασίας.
- Υλοποίηση συστημάτων αποτελούμενων από υλικό και λογισμικό για τον έλεγχο, δειγματοληψία, επεξεργασία, αποθήκευση και προβολή των δεδομένων.
- Βαθμονόμηση της διάταξης και των επιμέρους συστημάτων.
- Καταγραφή βελτιώσεων βάσει των αποτελεσμάτων επί των συστημάτων καταγραφής και ελέγχου καθώς και εκτέλεσης των μετρήσεων μελλοντικά.

1.3 Περίγραμμα της εργασίας

Στην εργασία γίνεται αναφορά στις θερμιδομετρικές διατάξεις,στις απώλειες που συναντώνται στους ημιαγωγούς και στη μοντελοποίηση, τη σχεδίαση και τη υλοποίηση της διάταξης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και σχολιάζονται οι μελλοντικές ενέργειες για τη βελτίωση της διάταξης.

Κεφάλαιο 2 : Πραγματεύεται τις υπάρχουσες και ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις για την μέτρηση απωλειών την αρχή λειτουργίας τους και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Κεφάλαιο 3 : Παρουσιάζονται οι διαδεδομένες θερμιδομετρικές διατάξεις και η αρχή λειτουργίας τους ενώ επιχειρείται και μια σύγκριση αυτών.

Κεφάλαιο 4 : Πραγματεύεται τις απώλειες που συναντώνται στους ημιαγωγούς πυριτίου (Si), καρβιδίου (SiC) του πυριτίου (Si) και νιτριδίου γαλλίου (GaN).

Κεφάλαιο 5 : Πραγματεύεται τη μοντελοποίηση και την προκαταρκτική σχεδίαση καθώς και την επιλογή των υλικών που συνθέτουν τη διάταξη. Επίσης περιγράφεται η υλοποίηση της διάταξης με την παρουσίαση κώδικα, κυκλωματικών διαγραμμάτων και την περιγραφή του συστήματος ανάκτηση, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων στον υπολογιστή.

Κεφάλαιο 6 : Παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα της. Γίνεται ανάλυση των δεδομένων και απεικόνιση των δεδομένων και στοιχειοθετείται η απόκλιση της μετρούμενης από την εγχεόμενη ισχύ.

2 Μέτρηση απωλειών

2.1 Γενικά

Η αναγκαιότητα γνώσης των απωλειών ισχύος σε οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος είναι αυτονόητη. Λόγω της αυξανόμενης χρήσης των ηλεκτρονικών ισχύος σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, η μέτρηση των απωλειών ισχύος με υψηλή ακρίβεια έχει μεγάλη σημασία στη διαδικασία σχεδιασμού για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος και τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών σχεδιασμού. Με γνώμονα την κατεύθυνση προς υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας στα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, οι ακριβείς εκτιμήσεις των απωλειών ισχύος έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία για τη σωστή διαχείριση των απωλειών, τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας καθώς και της μείωσης του κόστους των χρησιμοποιούμενων συσκευών για την ψύξη των ημιαγωγών [?]. Αν και οι αναλυτικές μεθόδοι ή αριθμητικές μεθόδοι μοντελοποίησης για την πρόβλεψη των απωλειών ισχύος είναι κοινότυπο εργαλείο και γνωρίζουν συνεχόμενη ανάπτυξη [?], η εγκυρότητα των μοντέλων πρέπει να επαληθεύεται πειραματικά, ιδίως όταν υπάρχουν πολύπλοκοι μηχανισμοί απωλειών, όπως για παράδειγμα μαγνητικά υλικά στους μετατροπείς ισχύος. Το έργο της μέτρησης των απωλειών γίνεται όλο και πιο δύσκολο με την ολοένα αυξανόμενη απόδοση και την άνοδο της συχνότητας λειτουργίας στου μετατροπείς.

2.2 Μέθοδοι μέτρησης απωλειών

Στην εργασία αυτή θα γίνει αναφορά σε δύο κατηγορίες μέτρησης των απωλειών στις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος : 1) η ηλεκτρική μέθοδος και 2) η θερμιδομετρική μέθοδος. Οι μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών των διατάξεων στην είσοδο και την έξοδο τους αποτελεί μία άμεση μέτρηση των απωλειών με τη χρήση αισθητήρων ρεύματος και τάσης για την εξαγωγή των απωλειών, ενώ στη θερμιδομετρική μέθοδος η μέτρηση μεγεθών όπως η θερμιοκρασία και η ροή του ψυκτικού μέσου την καθιστά μη παρεμβατική τη διαδικασία μέτρησης των απωλειών, με την έννοια ότι δεν προηγείται ή έπεται του κυκλώματος της διάταξης, μετρητικός εξοπλισμός.

2.3 Ηλεκτρική μέθοδος

Η ηλεκτρική μέτρηση χρησιμοποιεί όπως αναμένεται το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος από τα οποίο προκύπτει η ισχύς εισόδου και εξόδου και μέσω τη διαφοράς τους και οι απώλειες της διάταξης. Σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας, είναι σύνηθες να μετράται η ισχύς απευθείας με τη χρήση αναλογικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού: βολτόμετρα για μετρήσεις τάσης και αμπερόμετρα για μετρήσεις ρεύματος, ή μια συνδυασμένη μέτρηση με τη χρήση βαττομέτρου. Ωστόσο, για σήματα υψηλής συχνότητας και σήματα με έντονες παραμορφώσεις, όπως συναντώνται σε μετατροπείς σε πολυφασικά κινητήρια συστήματα, οι συμβατικοί μετρητές δεν είναι πλέον κατάλληλοι λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης και της δυναμικής απόκρισης συχνότητας [?]. Η κυριαρχία της μεθόδου στις περισσότερες εφαρμογές μέτρησης απωλειών στηρίζεται στο μικρό χρόνο εκτέλεσης των μετρήσεων και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

2.3.1 Ηλεκτρικές μετρήσεις με τη χρήση αναλογικών οργάνων

Σε αυτή τη μέθοδο, το αναλογικό όργανο χρησιμοποιείται απευθείας για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος της διάταξης. Η ακρίβεια του βαττομέτρου επιδεινώνεται συναρτήσει της συχνότητας των μετρούμενων μεγεθών, ιδίως όταν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος είναι μη ημιτονοειδείς και περιέχουν αρμονικές υψηλής συχνότητας. Αυτό το είδος βαττόμετρου έχει συνήθως χαμηλό εύρος ζώνης και κακή απόκριση συχνότητας και για αυτό το λόγο εφαρμόζεται μόνο σε μετρήσεις συνεχούς ρεύματος και ημιτονοειδών χαμηλής συχνότητας και είναι ακατάλληλο για συνθήκες υψηλής συχνότητας και μη ημιτονοειδών.

2.3.2 Ηλεκτρικές μετρήσεις με τη χρήση ψηφιακών οργάνων

Γενικά η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας που υπόκειται και η μέθοδος των αναλογικών οργάνων με τη διαφορά ότι η ψηφιακή επεξεργασία σήματος, επιτρέπει τη δειγματοληψία υψίσυχνων σημάτων, τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και την επαναληψιμότητα γεγονός που την καθιστά προσφιλή επιλογή για την μέτρηση των απωλειών σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιούνται υπό συνθήκη τα κατάλληλα όργανα για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος τα οποία επιλέγονται με γνώμονα το εύρος τιμών, το εύρος ζώνης του μετρούμενου σήματος καθώς και την ακρίβειας τους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συλλέγονται, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται στον ψηφιακό αναλυτή ισχύος ή σε κάποιο άλλο υπολογιστικό σύστημα. Εκεί υπολογίζονται η ισχύς, οι απώλειες και η απόδοση. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2, όπου απεικονίζεται ένα κινητήριο σύστημα. Η διάταξη αφορά την μέτρηση των απωλειών του μετατροπέα ως μέρος της διάταξης. Οι αναλυτές ισχύος εκτός από την χρήση μετρητικών οργάνων υψηλής ακριβείας για τη μέτρηση των μεγεθών υλοποιούν και χρησιμοποιούν ψηφιακά φίλτρα για την εξομάλυνση του σήματος εισόδου και αποθορυβοποίηση του ή και της ταυτόχρονης ανάλυσης του αρμονικού περιεχομένου μαζί με την εξαγωγή της ισχύς. Ακόμα η σύνδεση όλων των αισθητηρίων και ο τερματισμός τους στην συσκευή παίζει ρόλο στην απομόνωση από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και συνεπώς τον προκαλούμενο θόρυβο που υπεισέρχεται στα σήματα.



Σχήμα 2: Μετρητική διάταξη με χρήση ψηφιακών μετρήσεων [?]

2.3.3 Ακρίβεια ψηφιακών μετρήσεων

Εν γένει οι αισθητήρες τάσης και έντασης καθώς και το σύστημα συλλογής δεδομένων θα πρέπει εκ προοιμίου να έχουν επιλεγεί με βάση τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα, δηλαδή να καλύπτουν το εύρος ζώνης και τις ακραίες τιμές των ρευμάτων και της τάσης που προκύπτουν κατά τη δοκιμή. Η μέτρηση μετατροπέων που υλοποιούν τεχνικές εύρους παλμού διαμόρφωσης (PWM) είναι οι πιο απαιτητικές τόσο για τους αισθητήρες όσο και για τον αναλυτή ισχύος και λόγω της ευρείας χρήσης τέτοιου είδους μετατροπέων θα επικεντρωθεί η παρακάτω ανάλυση στην ακρίβεια που απαιτείται για τη μέτρηση τους. Να σημειωθεί ότι το εύρος και η ακρίβεια της μέτρησης από την πλευρά των αισθητηρίων εξαρτάται αποκλειστικά από εύρος ζώνης αλλά και την ακρίβεια σε αυτός το εύρος τιμών του αισθητήρα. Είναι σαφές έτσι ότι η επιλογή των αισθητήρων αλλά και της συσκευής θα πρέπει να γίνεται εμπεριστατωμένα.

Για τη μέτρηση ρεύματος στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος, το εύρος συχνοτήτων καθορίζεται από τις αρμονικές ρεύματος, όπου συνήθως αρκεί να είναι λίγα πολλαπλάσια της διακοπτικής συχνότητας. Για τη μέτρηση της τάσης, η επιλογή του εύρους ζώνης πρέπει να είναι αρκετά πολλαπλάσια της διακοπτικής συχνότητας, εφόσον λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις η κλίση των παλμών διαμόρφωσης [?].

Οι μετρήσεις ισχύος μπορούν να γίνουν με ειδικά συστήματα ανάλυσης ισχύος. Να σημειωθεί ότι η ακρίβεια αυτών των οργάνων δεν είναι σταθερή στο εύρος ζώνης, αλλά κυμαίνεται με τη συχνότητα αναφοράς συνήθως να είναι αυτή του δικτύου (50Hz ή 60Hz), ενώ και οι αναφερόμενες τιμές βασίζονται σε συντελεστή ισχύος τη μονάδα (σ.ι = 1) [?].

Η ακρίβεια των μετρήσεων και εν τέλει το σφάλμα στη μέτρηση των απωλειών της διάταξης όπως είναι κατανοητό δεν προκύπτει από ένα μεμονωμένο φαινόμενο ή χαρακτηριστικό του μετατροπέα ή των αισθητήρων ή του αναλυτή ισχύος. Προκύπτει από την υπέρθεση των επιμέρους σφαλμάτων όλων των παραπάνω. Δεδομένων των ξεχωριστών τιμών σφαλμάτων συναρτήσει της συχνότητας του κάθε υποσυστήματος στο σύστημα μέτρησης, προστίθεται επιπλέον δυσκολία στον σαφή χαρακτηρισμό του σφάλματος στην ακρίβεια του όλου συστήματος. Παρακάτω γίνεται σύντομη αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια στη μέτρηση των απωλειών ισχύος [?] :

- 1. Σφάλμα Φάσης: Το σφάλμα στη διαφορά φάσης δύο σημάτων τα οποία δειγματοληπτούνται, οδηγεί σε σφάλμα στον υπολογισμό της ενεργού ισχύος και του συντελεστή ισχύος.
- 2. Λόγος απόρριψης κοινού σήματος (CMRR): Ο θόρυβος κοινού σήματος αποτελεί μία πηγή σφάλματος στη μέτρηση, συναντάται σε διατάξεις με χαρακτηριστικά τις ταχείες εναλλαγές στην τάση ή και την ένταση (dv/dt και di/dt) και το αρμονικό περιεχόμενο.
- Συντελεστής κορυφογραμμής (Crest Factor = Μέγιστη τιμή/RMS τιμή): Υψηλότερος λόγος δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του μετρητή, ειδικά για σήματα με παραμορφώσεις.
- 4. Αβεβαιότητα αισθητήρων έντασης: Η εισαγωγή αισθητήρων αυξάνει την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Η χρήση αισθητήρων μηδενικής ροής (zero flux current sensors) είναι απαραίτητη για τη μείωση της επίδρασης στην ακρίβεια του αναλυτή.
- 5. Επίδραση της θερμοκρασίας: Οι αλλαγές θερμοκρασίας επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Συστήματα ψύξης ή εξαρτήματα με χαμηλή θερμοκρασιακή μετατόπιση (drift) είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση υψηλής ακρίβειας.
- 6. Ανίχνευση μηδενικών διαβάσεων (Zero Crossing Detection): Για την ακριβή μέτρηση της ισχύος, η γνώση του σημείου μηδενισμού των σημάτων τάσης και έντασης είναι κρίσιμη.
- Βαθμονόμηση: Οι μετρήσεις πρέπει να βαθμονομηθούν για τη μείωση των τυχαίων σφαλμάτων. Οι υπάρχουσες τεχνικές διασφαλίζουν βαθμονόμηση έως τα 60 Hz και κάτω από τα 100 kHz.

2.3.4 Αβεβαιότητα μετρήσεων

Η μέτρηση των απωλειών επομένως όπως προκύπτει από τα παραπάνω επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη διαδικασία της εξαγωγής των απωλειών. Καθίσταται σαφές ότι υπάρχει σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση μεταξύ δύο μεγεθών των οποίων οι τιμές είναι παρόμοιες, όπως μπορεί να συμβαίνει στις συσκευές υψηλής απόδοσης όπου η ισχύς εισόδου με τη ισχύ εξόδου παρουσιάζουν μικρή διαφορά. Προκύπτει ότι για ακόμα και μικρά σφάλματα της ταξης 0.5% στη μέτρηση της τάσης και της έντασης το σχετικό σφάλμα στη μέτρηση των απωλειών για απόδοση μεγαλύτερη του 95% μπορεί να φτάνει το 30% και έχει εκθετική αύξηση όπως φαίνεται και από στο σχήμα 3α'. Ακόμα στην περίπτωση ημιτονοειδών σημάτων, η ισχύς προκύπτει από το γινόμενο της τάσης επί την ένταση επί τη διαφορά φάσης. Εκεί το σφάλμα στη διαφορά φάσης $\Delta \theta$ δύναται να αλλοιώσει για μεγάλες τιμές διαφοράς φάσης τη μετρούμενη ισχύ, όπως φαίνεται στο σχήμα 3β'. Προκύπτει πως για $F_s = 1000 \times F_0$, και διαφορά φάσης περίπου στις $\theta = 90^\circ$ το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από 15%, όπου F_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας και F_0 η συχνότητα της θεμελιώδους.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt = VI\cos\theta$$
(1)

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο την αβεβαιότητα στο σφάλμα μέτρησης της διαφοράς φάσης και αγνοώντας τα σφάλματα ρεύματος και τάσης, προκύπτει για μικρά Δθ :

$$\frac{\Delta P}{P} = \tan\theta \cdot \Delta\theta \times 100\%.$$
 (2)

Το ποσό του σφάλματος λόγω της αβεβαιότητας στη μέτρηση της φάσης, ισοδυναμεί με το βήμα της μετρούμενης φάσης για N δείγματα :

$$e = \frac{360^{\circ}}{N} \tag{3}$$

Το παραπάνω πόσο σφάλματος μεγιστοποιείται και δίνει το μέγιστο σφάλμα διαφορά φάσης ίσο με $\Delta \theta = 2e$, όπου $N = F_s/F_0$ ο αριθμός δειγμάτων σε μία περίοδο δειγματοληψίας.

150 percentage error (%) 135 120 105 N=500 90 N=100 75 60 5000 45 30 15 N = 100000 87.5 88 88.5 89 89.5 90 87 phase angle (°)

(α') Ποσοστιαίο σφάλμα της μέτρησης των απωλειών σε σχέση με την απόδοση για δεδομένο σφάλμα τάσης και ρεύματος [?]

(β') Ποσοστό σφάλματος που προκαλείται από την αβεβαιότητα δειγματοληψίας στη διαφορά φάσης συναρτήσει της διαφοράς φάσης για διαφορετικά δείγματα (N) [?]

Σχήμα 3: Αβεβαιότητα μετρήσεων στην ψηφιακή μέθοδο.

Όπως προκύπτει η ψηφιακή μέθοδος για μετατροπείς με υψηλές αποδόσεις $\eta > 95\%$ και σφάλμα μέτρησης $\varepsilon = 0.5\%$ ξεπερνάει το 5% [?]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην επαρκεί για τη εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις απώλειες της μετρούμενης διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.

3 Θερμιδομετρική μέθοδος

Η θερμιδομετρική μέθοδος εξαγωγής των απωλειών είναι μια έμμεση μέθοδος με την έννοια ότι, ότι τα μετρούμενα μεγέθη δεν είναι η τάση και το ρεύμα εισόδου και εξόδου του μετατροπέα, αλλά η θερμοκρασία του ρευστού (συνήθως νερό,λάδι ή αέρας) από το οποίο γίνεται η απαγωγή της θερμότητας που παράγεται λόγω των απωλειών του μετατροπέα. Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος αυτή μετράει άμεσα τις απώλειες τις διάταξης. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτό να εκτιμηθεί η απόδοση του μετατροπέα υπό εξέταση χωρίς την πρόσθετη πολυπλοκότητα από την παρουσία αρμονικού περιεχομένου στην τάση και το ρεύμα εισόδου / εξόδου του μετατροπέα και την πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν η κατασκευή κυκλωμάτων και ο κώδικας για την εξαγωγή της διαφοράς φάσης και του αρμονικού περιεχομένου στου των τάσεων και των ρευμάτων.

3.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της θερμιδομετρίας έχει ως στόχο την άμεση μέτρηση, σε αντιδιαστολή με τις ηλεκτρικές μεθόδους, των απωλειών του μετατροπέα υπό μορφή θερμότητας και οι οποίες εκλύονται στο εγγύς περιβάλλον γύρω από αυτόν. Στην θερμιδομετρική μέθοδο η διάταξη προς μέτρηση βρίσκεται τοποθετημένη μέσα σε ένα θερμικά μονωμένο χώρο. Οι απώλειες λόγω της λειτουργίας της συσκευής υπό δοκιμή έχουν σαν αποτέλεσμα την έκλυση θερμότητας στον μονωμένο χώρο. Οι απώλειες αυτές με κατάλληλα επιμέρους συστήματα τα οποία αποτελούν εν γένει την θερμιδομετρική διάταξη απορροφούν τη θερμότητα που παράγεται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση για τη μεταφορά θερμότητας μέσω μάζας :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{4}$$

όπου:

- Q: Θερμότητα, J
- m: Μάζα, kg
- c_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα: $\frac{J}{ka \cdot c}$
- ΔT: Μεταβολή θερμοκρασίας, μονάδα: Βαθμοί Κελσίου, °C ή Κέλβιν, K

ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

3.2 Τυπικές θερμιδομετρικές διατάξεις

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στη θερμιδομετρική μέθοδο υπολογισμού της απόδοσης, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτές του κλειστού τύπου και αυτές του ανοιχτού τύπου. Η διαφοροποίηση αυτή έχει να κάνει με ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται σε κάθε διάταξη.

Στη διάταξη ανοιχτού τύπου το κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας είναι ανοικτό, με την έννοια ότι το ψυκτικό μέσο που είναι ο αέρας, εισχωρεί ψυχρότερος από μια οπή στο χώρο που βρίσκεται συσκευή προς μέτρηση και εξέρχεται από μια δεύτερη θερμότερος. Τα μεγέθη από τα οποία θα εξαχθούν οι απώλειες είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός μεταβολής της ροής του ψυκτικού μέσου μέσα στον χώρο.Στις διατάξεις ανοικτού τύπου, η συσκευή προς μέτρηση βρίσκεται εντός θερμικά μονωμένου χώρου ο οποίος συνδέεται με τον εξωτερικό χώρο μέσω των δύο οπών. Η ανταλλαγή θερμότητας λαμβάνει χώρα μεταξύ του εσωτερικού όγκου, στον οποίο βρίσκεται η συσκευή και του εξωτερικού όγκου που είναι ο αέρας.

Στη διάταξη κλειστού τύπου η ειδοποιός διαφορά με την ανοικτού τύπου είναι στο κλειστό κύκλωμα μεταφοράς θερμότητας. Με την έννοια κλειστό κύκλωμα εννοείται πως ο όγκος του ψυκτικού μέσου (νερό,λάδι) δεν ανανεώνεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης αλλά είτε κυκλοφορεί είτε είναι στάσιμο σε έναν καθορισμένο όγκο. Στις διατάξεις κλειστού τύπου η συσκευή προς μέτρηση είναι περίκλειστη με μονωτικό υλικό έτσι ώστε να επιτευχθεί η θερμική της απομόνωση από τον περιβάλλοντα χώρο. Η διάταξη μπορεί εκ νέου να χωριστεί σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η μέτρηση των απωλειών. Η πρώτη κατηγορία αφορά της διατάξεις που οδηγούν τη συσκευή σε θερμική ισορροπία (μόνιμης κατάστασης) και η δεύτερη κατηγορία αφορά τις διατάξεις που πραγματοποιούν μέτρηση των απωλειών κατά τη μεταβατική κατάσταση. Εντούτοις ενώ και στις δύο περιπτώσεις η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια, η πρώτη και η δεύτερη κατηγορίες κλειστού τύπου παρουσιάζουν διαφορές.

Χαρακτηριστικά	Ανοιχτού Τύπου	Κλειστού Τύπου – Διπλού τοιχώματος	
Ψυκτικό ρευστό	Αέρας	Υγρό	
Εναλλάκτης θερμότητας	Όχι	Ναι	
Ευαισθησία στη διακύμανση παραμέτρων περιβάλλοντος	Μεγάλη	Καμία	
Διαστάσεις	Μεγάλο	Μικρό	
Θερμικές απώλειες μέσω τοιχωμάτων	Ανάλογες της διαφοράς εσωτερικής / εξωτερικής θερμοκρασίας	Ελάχιστες (Ενεργός αντιστάθμιση)	
Απόδοση εναλλαγής θερμότητας	Χαμηλή	Υψηλή	
Κόστος	Χαμηλό	Μέσο	
Χρόνος πειράματος	Υψηλός	Μέτριος	
Ακρίβεια μετρήσεων	Μέτρια	Υψηλή	

Πίνακας 1: Σύγκριση Ανοιχτού και Κλειστού Τύπου Συστημάτων

Σχήμα 5: Σύγκριση διατάξεων κλειστού και ανοιχτού τύπου [?]

Οι θερμιδομετρικές διατάξεις όπως φαίνονται στο σχήμα 4 αποτελούν διαφορετικές κατασκευές των παραπάνω τύπων, η κάθε μία από τις οποίες έχει διακριτή διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των απωλειών της συσκευής υπό δοκιμή. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη αναφορά και περιγραφή της λειτουργίας τους.

Η θερμιδομετρική διάταξη θερμικής ισορροπίας Λειτουργεί με τη διενέργεια δύο παρόμοιων δοκιμών. Η πρώτη δοκιμή διεξάγεται με τη συσκευή υπό δοκιμή και καταγράφεται η θερμοκρασία του αέρα στη μόνιμη κατάσταση. Στη συνέχεια, στον όγκο τοποθετείται ωμικό φορτίο που τροφοδοτούνται από γνωστή πηγή ισχύος, ώστε να επιτευχθεί η ίδια αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα με εκείνη που επιτεύχθηκε προηγουμένως. Υποθέτοντας ότι οι συνθήκες του αέρα (ψυκτικό ρευστό) και διαρροής θερμότητας είναι συνεπείς και στις δύο δοκιμές, η ισχύς που παρέχεται στο θερμαντήρα στη δεύτερη δοκιμή ισούται με τις απώλειες της συσκευής υπό δοκιμή. Με αυτή την τεχνική, δεν υπάρχει πλέον η ανάγκη ακριβούς εξακρίβωσης των θερμικών ιδιοτήτων του ψυκτικού ρευστού, όπως στις δοκιμές με θερμιδομετρική διάταξη ανοικτού τύπου. Όμως για να θεωρηθεί ότι η ισχύς που παράγεται από το ωμικό φορτίο ισοδυναμεί με τις απώλειες της μετρούμενης συσκευής. Πρέπει να διατηρούνται σταθερές οι συνθήκες που μοιράζονται από κοινού τα δύο δοκίμια, το οποίο επιβάλει μια αυστηρή συνθήκη για την εκτέλεση της δοκιμής.

Η θερμιδομετρική διάταξη σε σειρά ή διπλού θαλάμου αποτελεί μια βελτίωση της θερμιδομετρικής διάταξης θερμικής ισορροπίας.Διαθέτει δύο διαδοχικούς θαλάμους, πανομοιότυπους από κάθε άποψη, ένας για την πραγματική συσκευή δοκιμής και ο άλλος για τη διεξαγωγή πανομοιότυπης δοκιμής με ωμικό φορτίο. Το ψυκτικό ρευστό, ο αέρας, οδηγείται από τον πρώτο θάλαμο στον δεύτερο. Αν και η μέθοδος αυτή μειώνει το χρόνο δοκιμής στο μισό, από την άλλη πλευρά, μπορεί να δώσει ανακριβείς υψηλότερες από τις αναμενόμενες απώλειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, επειδή πρέπει να διατηρηθεί η ίδια αύξηση της θερμοκρασίας και στους δύο θαλάμους, το ψυκτικό υγρό είναι θερμότερο σε έναν από τους δύο θαλάμους, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μεγαλύτερες θερμικές διαρροές. Επίσης, οι θερμικές ιδιότητες του αέρα μεταβάλλονται με την αλλαγή θερμοκρασίας γεγονός που συμβάλλει στην πολυπλοκότητα εφόσον πρόκειται για δύο θαλάμους με άνισες θερμοκρασίες. Λόγω του μεγαλύτερου όγκου που απαιτείται για αυτόν τον σχεδιασμό θερμιδόμετρου, το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο.

3.3 Μέθοδος μεταβατικής κατάστασης

Ενώ οι θερμιδομετρικές μέθοδοι στη μόνιμη κατάσταση επιτυγχάνουν υψηλότερη ακρίβεια από τις εναλλακτικές λύσεις, οι σταθερές χρόνου σε όλες τις διατάξεις που παρουσιάστηκαν εδώ είναι κάποιες ώρες, δημιουργώντας δυσκολία στην επίτευξη αλλεπάλληλων σύντομων μετρήσεων σε αντίθεση με την ψηφιακή μέθοδο του αναλυτή ισχύος. πρόβλημα που διατυπώνεται μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση θερμιδομετρικών μεθόδων μέτρησης απωλειών στη μεταβατική κατάσταση. Η αρχή λειτουργίας,που είναι διαφορετική από την αρχή λειτουργίας των θερμιδομετρικών διατάξεων σε μόνιμη κατάσταση, βασίζεται στην καταγραφή και μελέτη της μεταβατικής θερμικής συμπεριφοράς της συσκευής δοκιμής, η οποία είναι συζευγμένη με το ρευστό στο οποίο λαμβάνεται η μέτρηση. Μετά από βαθμονόμηση της συσκευής εντός του ρευστού - κάποιο μη αγώγιμο ρευστό λ.χ έλαιο - με τη χρήση ωμικών φορτίων και αναλύοντας τα δεδομένα και συγκρίνοντας με αναλυτικές καμπύλες της διαφορικής εξίσωσης που εκφράζει το σύστημα : :

$$P(t) = C_{\rm th} \frac{dT(t)}{dt}$$
⁽⁵⁾

όπου :

- P(t) απώλειες,
- C_{th} θερμοχωρητικότητα,

υπολογίζεται η C_{th} . Γνωρίζοντας τη θερμοχωρητικότητα μπορούν να προκύψουν οι απώλειες της συσκευής υπό δοκιμή. Οι σταθερές χρόνου με αυτή την διάταξη μειώνονται σε μερικά δευτερόλεπτα, το οποίο και ήταν το ζητούμενο.[?]

3.4 Σύγκριση θερμιδομετρικών διατάξεων

Εν γένει συγκριτικά με τις υπάρχουσες ψηφιακές ηλεκτρικές μεθόδους οι θερμιδομετρικές διατάξεις παρουσιάζουν ένα σταθερό σφάλμα μέτρησης το οποίο δεν εξαρτάται από τον τύπο του μετατροπέα, αυτό έχει σαν συμπέρασμα οι θερμιδομετρικές διατάξεις να είναι αποτελεσματικότερες στη μέτρηση μετατροπέων πολύ υψηλής απόδοσης. Ακόμα συγκρίνοντας τις θερμιδομετρικές διατάξεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5 οι διατάξεις κλειστού τύπου παρουσιάζουν μικρότερο σφάλμα στη μέτρηση συγκριτικά με τις ανοικτού τύπου,ιδιαίτερα και αυτές που έχουν διπλό τοίχωμα και θερμική αντιστάθμιση ώστε να απομονώνεται θερμικά η συσκευή από το εξωτερικό περιβάλλον στο μέγιστο βαθμό.

4 Μηχανισμός απωλειών ισχύος

Ένα βασικό στάδιο στη διαδικασία σχεδιασμού ενός μετατροπέα ισχύος είναι αυτό του υπολογισμού της απόδοσης του, δηλαδή της εύρεσης των απωλειών στη διάταξη από όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που απαρτίζουν έναν μετατροπέα (διακόπτες ισχύος, κυκλώματα οδήγησης και κυκλώματα ελέγχου). Οι απώλειες των διακοπτών ισχύος καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών εφόσον διαχειρίζονται το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εισόδου του κυκλώματος. Η χρησιμοποίηση μετατροπέων με διακοπτική συχνότητα δεκάδων και εκατοντάδων kHz είναι εξαιρετικά διαδεδομένη λύση.Σε αυτό βοήθησε η ευρεία χρήση των διακοπτών ισχύος τύπου MOSFET [?], τα οποία λόγω του χαμηλού φορτίου της πύλης τους απαιτούν λίγη ενέργεια για την αλλαγή κατάστασης τους επιτυγχάνοντας έτσι υψηλές διακοπτικές συχνότητες [?]. Η δυνατότητα επομένως του υπολογισμού των απωλειών των ημιαγωγικών διακοπτών, καθίσταται απαραίτητη καθώς ο σωστός υπολογισμός των απωλειών έχει ως συνέπεια τη σωστή διαστασιολόγηση της ψύκτρας και άρα τη αποφυγή πλεονάζοντα όγκου και κόστους στην κατασκευή.

Οι ημιαγωγοί Si MOSFET χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μετατροπέων με τάσεις < 200V όπως οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος και κινητήρια συστήματα μικρών οχημάτων.Η εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών εισήγαγε δύο νέες τεχνολογίες οι οποίες βρίσκουν πεδίο εφαρμογών.Αυτές είναι τα SiC MOSFET και τα GaN FET. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν συγκριτικά περισσότερα πλεονεκτήματα. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 2. Στον παρακάτω πίνακα 2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά και των τριών τεχνολογίων. Από τον πίνακα προκύπτει οι νέες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλότερη τάση διάσπασης, υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας καθώς και υψηλή διακοπτική συχνότητα.Η τομή των SiC Mosfet και GaN φαίνονται στα 6 και 7 αντίστοιχα.

Παράμετροι	Si	SiC (4H-SiC)	GaN
$E_g(0)$ (eV)	1.170	3.263	3.47
$lpha imes 10^4$ (eV/K)	4.73	6.5	7.7
β (K)	636	1300	600
$E_{g}(300)$ (eV)	1.124	3.23	3.39
Κινητικότητα Ηλεκτρονίων στους 300K (cm²/V·s)	1400	650	1500

Πίνακας 2: Σύγκριση Si,SiC,GaN [?]

Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των απωλειών χωρίζονται εν γένει σε τρεις κατηγορίες, τον υπολογισμό με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων, την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, και την ανάλυση μέσω συμπεριφορικών μοντέλων [?]. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, στην πολυπλοκότητα και στο χρόνο εκτέλεσης.Ο υπολογισμός με τη χρήση του αναλυτικού μοντέλου, ενώ είναι ο λιγότερο ακριβής από τους τρεις,προσφέρει τη δυνατότητα της παραγωγής μεγάλου όγκου αποτελεσμάτων σε εύλογο χρόνο και είναι αυτός ο τρόπος ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.

4.1 Χαρακτηρισμός απωλειών

Οι απώλειες που προκαλούνται από τη λειτουργία του ημιαγωγού ως διακόπτη ισχύος μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι οι απώλειες αγωγής και η δεύτερη κατηγορία είναι οι διακοπτικές απώλειες. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή και υπολογισμός των απωλειών για μια ημιγέφυρα.

Σχήμα 6: Δομή SiC MOSFET, [?]

4.1.1 Απώλειες αγωγής P_{CM}

Οι απώλειες αγωγής μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την υπόθεση ότι κατά την αγωγή η αντίσταση του καναλιού ισούται με την $R_{\rm DS(on)}$ όπως αυτή παρέχεται στα τεχνικά φυλλάδια. Σε μία διακοπτική περίοδο οι απώλειες προκύπτουν από τον τύπο :

$$P_{\rm CM} = \frac{1}{T_{\rm sw}} \int_0^{T_{\rm sw}} p_{\rm CM}(t) dt = \frac{1}{T_{\rm sw}} \int_0^{T_{\rm sw}} \left(R_{\rm DS(on)} \cdot i_D^2(t) \right) dt = R_{\rm DS(on)} \cdot I_{D,\rm rms}^2$$
(6)

Η τιμή της αντίστασης αγωγής είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού.Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβολής εφόσον υπάρχει γνώση της θερμοκρασίας της επαφής, χρησιμοποιείται ο τύπος :

$$R_{\mathrm{DS(on}}(T_J) = R_{\mathrm{DS(on)MAX}}(25^{\circ}\mathrm{C}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)^{T_J - 25^{\circ}\mathrm{C}}$$
(7)

Οι απώλειες της παρασιτικής διόδου του MOSFET η οποία άγει κατά την ανάστροφη φορά, δηλαδή από την πηγή προς τον απαγωγό, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια δίοδος σε σειρά με μια πτώση τάσης V_d και μία αντίσταση R_d, οι οποίες αντικατοπτρίζουν στατικά τα χαρακτηριστικά της διόδου στην ορθή πόλωση. Η μαθηματική έκφραση για μια διακοπτική περίοδο είναι:

$$P_{\rm CD} = \frac{1}{T_{\rm sw}} \int_0^{T_{\rm sw}} \left(u_{D0} \cdot i_F(t) + R_D \cdot i_F^2(t) \right) dt = u_{D0} \cdot I_{F\rm av} + R_D \cdot I_{F\rm rms}^2$$
(8)

Σχήμα 8: Κανάλι αγωγής MOSFET, [?]

4.1.2 Διακοπτικές απώλεις P_s

Οι διακοπτικές απώλειες παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στην εξαγωγή τους και αυτό γιατί τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του ημιαγωγού δυσχεραίνουν τους υπολογισμούς. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα μια εκτίμηση των απωλειών λαμβάνοντας ως γραμμικές τις μεταβολές ανά διαστήματα του μηχανισμού της διακοπής ενός ημιαγωγού MOSFET. Στο σχήμα 9 φαίνονται οι παρασιτικές χωρητικότητες οι οποίες χαρακτηρίζουν την τάση και την ένταση στα άκρα του διακόπτη κατά τη μεταβατική κατάσταση της αγωγής. Οι τιμές αυτών είναι μη γραμμικές και εξαρτώνται από την τάση που τους επιβάλλεται καθώς και από τη θερμοκρασία.

Σχήμα 9: Κυκλωματικό μοντέλο MOSFET με τα παρασιτικά του στοιχεία, [?]

Ο υπολογισμός των απωλειών που ακολουθεί έγινε με βάση το σχήμα :

4.1.3 Μετάβαση προς την αγωγή (switch on):

• Το κύκλωμα οδήγησης μεταβάλλει την τάση στην πύλη από τα 0V σε $U_{\rm DR}$, με αποτέλεσμα η τάση να αυξάνει στη τάση κατωφλιού $U_{\rm GS(th)}$, με το χρόνο μετάβασης να εξαρτάται από την αντίσταση της πύλης και τη χωρητικότητα της πύλης : $C_{\rm iss} = C_{\rm GD} + C_{\rm GS}$. Αφού τιμής της τάσης της πύλης ξεπεράσει την τάση κατωφλιού, το ρεύμα του καναλιού αρχίζει να ανεβαίνει έως την τελική τιμή του σε μέγιστο χρόνο $t_{\rm r}$. Κατά την άνοδο το ρεύματος, η παρασιτική δίοδος του έτερου διακόπτη της γέφυρας είναι ορθά πολωμένη, επομένως στα άκρα του διακόπτη που εξετάζουμε εμφανίζεται όλη η τάση του ζυγού $U_{\rm DD}$. Στη συνέχεια ακολουθεί η αποφόρτιση της διόδου η οποία προκαλεί απώλειες που απορροφώνται από το MOSFET. Η τιμή για τη χειρότερη περίπτωση του φορτίου ανάστροφης ανάκτησης και του χρόνου ($Q_{\rm rr}, t_{\rm rr}$ αντίστοιχα) προκύπτουν από το τεχνικό φυλλάδιο.Αφού η δίοδος φτάσει σε αποκοπή,η τάση στα άκρα του διακόπτη αρχίζει να μειώνεται μέχρι την τελική της τιμή $U_{\rm DS} = R_{\rm DS(on)} \cdot I_{\rm on}$ ενώ η τάση στην πύλη λόγω του φαινομένου Miller στον πυκνωτή $C_{\rm GD}$ μένει σταθερή έως ότου η τάση στα άκρα φτάσει περίπου περίπου στην τελική της τιμή, έπειτα η τάση της πύλης αυξάνετε εκ νέου μέχρι την τελική της τιμή $U_{\rm DR}$.

4.1.4 Μετάβαση προς την αποκοπή (switch off):

Το μεταβατικό προς την αποκοπή περιγράφεται όπως ακριβώς και το μεταβατικό στην αγωγή.
 Ωστόσο εδώ δεν περιλαμβάνονται οι απώλειες από την αποφόρτισης της παρασιτικής διόδου καθώς αυτές μεταφέρονται στον άλλο διακόπτη του ζεύγους της ημιγέφυρας.

Η εξαγωγή των εκφράσεων για τις απώλειες αγωγής και τις διακοπτικές απώλειες βασίστηκε όπως

Σχήμα 10: Χαρακτηριστικές διακοπής MOSFET ημιγέφυρας με επαγωγικό φορτίο, [?]

και η παραπάνω ανάλυση στην τενχική έκθεση [?] και στα [?],[?]. Οι απώλειες ενέργειας κατά το μεταβατικό σε αγωγή (E_{onM}) μπορούν να υπολογιστούν ως το άθροισμα της ενέργειας από όλες τις γραμμικές μεταβολές κατά το μεταβατικό:

$$E_{\rm onM} = \int_0^{t_{\rm fu} + t_{\rm ri}} u_{\rm DS}(t) \cdot i_{\rm D}(t) \, dt = E_{\rm onMi} + E_{\rm onMrr} = U_{\rm DD} \cdot I_{\rm D} \cdot (t_{\rm ri} + 2 \cdot t_{\rm fu}) + Q_{\rm rr} \cdot U_{\rm DD}$$
(9)

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος ρεύματος αποφόρτισης της διόδου προκύπτει ως:

$$I_{\rm rrpeak} = \frac{Q_{\rm rr}}{t_{\rm rr}} \tag{10}$$

και η ενέργεια αυτού (E_{onD}):

$$E_{\rm onD} = \int_0^{t_{\rm fu} + t_{\rm ri}} u_{\rm D}(t) \cdot i_{\rm F}(t) \, dt \approx E_{\rm onDrr} = Q_{\rm rr} \cdot U_{\rm DD} \tag{11}$$

όπου $U_{\rm Drr}$ είναι η τάση στη δίοδο κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης της διόδου . Για τον υπολογισμό των απωλειών στην περίπτωση του χειρότερου σεναρίου, αυτή η τάση μπορεί να προσεγγιστεί με την τάση τροφοδοσίας $U_{\rm Drr} = U_{\rm DD}$. Οι απώλειες ενέργειας κατά το μεταβατικό σε αποκοπή σε συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν με παρόμοιο τρόπο, όπου εδώ δεν λαμβάνονται οι απώλειες της αποφόρτισης της διόδου :

$$E_{\rm offM} = \int_0^{t_{\rm fi} + t_{\rm ru}} u_{\rm DS}(t) \cdot i_{\rm D}(t) \, dt = U_{\rm DD} \cdot I_{\rm D} \cdot (t_{\rm ru} + t_{\rm fi}) \tag{12}$$

Καταληκτικά οι διακοπτικές απώλειες είναι το γινόμενο των παραπάνω τιμών ενέργειας με τη διακοπτική συχνότητα :

$$P_{\rm swM} = (E_{\rm onM} + E_{\rm offM}) \cdot f_{\rm sw} \tag{13}$$

$$P_{\rm swD} = (E_{\rm onD} + E_{\rm offD}) \cdot f_{\rm sw} \approx E_{\rm onD} \cdot f_{\rm sw}$$
(14)

Καταληκτικά οι διακοπτικές και οι απώλειες αγωγής που προκύπτουν για το MOSFET και την παρασιτική δίοδο του από τα παραπάνω είναι :

$$P_M = P_{\rm CM} + P_{\rm swM} = R_{\rm DS(on)} \cdot I_{\rm D,rms}^2 + (E_{\rm onM} + E_{\rm offM}) \cdot f_{\rm sw}$$
(15)

$$P_D = P_{\rm CD} + P_{\rm swD} = u_{\rm D0} \cdot I_{\rm Fav} + R_{\rm D} \cdot I_{\rm F.rms}^2 + E_{\rm onD} \cdot f_{\rm sw}$$
(16)

4.2 Προσομοίωση του μοντέλου απωλειών

Σε συνέχεια της παραπάνω ανάλυση, το μοντέλο απωλειών δοκιμάστηκε σε προσομοίωση. Στόχος ήταν η υλοποίηση ενός κώδικα για την διερεύνηση την συμπεριφοράς και της ευαισθησίας των απωλειών σε διάφορες παραμέτρους καθώς και για τη μελλοντική βελτίωση του μοντέλου με την προσθήκη των προτάσεων της βιβλιογραφίας.

Χαρακτηριστικά MOSFET IAUTN12S5N018T		
Παράμετρος	Τιμή	
Τάση V _{DS}	120 V	
$\mathbf{R}_{\mathbf{DS(on)}} @ \mathbf{V}_{\mathrm{GS}} = 10 \mathrm{V}$	1.8 mΩ	
ID	120 A	
Q _G	72 nC	
V _{GS(th)}	1.8 V	
P _{tot}	300 W	
Θερμοκρασία λειτουργίας επαφής	-55°C έως 175°C	

Παρατηρείται στο σχήμα 11 και στο σχήμα 12 η εξάρτηση των απωλειών συναρτήσει του ρεύματος. Για τον υπολογισμό των απωλειών της αντίστασης καναλιού δεν έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο αντιστάθμισης. Οι τιμές της θερμοκρασίας είναι ενδεικτικές και χρησιμοποιήθηκαν για να παρατηρηθεί η σχέση της θερμοκρασίας στο κέλυφος του ημιαγωγού με την επαφή.

Σχήμα 11: Απώλειες διακόπτη ισχύος MOSFET

Σχήμα 12: Θερμοκρασίες διακόπτη στην επαφή και στο κέλυφος

5 Προκαταρτική σχεδίαση

5.1 Μετάδοση θερμότητας

Οι απώλειες στις διατάξεις που μελετάμε εμφανίζονται ως θερμότητα, απόρροια του φαινομένου Joule. Το φαινόμενο μεταφορά θερμότητας από έναν διακόπτη ισχύος (λ.χ MOSFET) οφείλεται στη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της επαφής (junction) και της θερμοκρασίας του υλικού που περιβάλλει το κέλυφος του (casing).Στην κατηγορία των υλικών μπορούν να ανήκουν στερεά (λ.χ πυρίτιο,χαλκός,αλουμίνιο,FR4) ή ρευστά (λ.χ αέρα,μη αγώγιμο λάδι. Η μεταφορά θερμότητας εκφράζεται μέσω τριών καταστάσεων α) της αγωγής β)της συναγωγής και γ) της ακτινοβολίας. Με αυτά τα φαινόμενα περιγράφονται όλες οι πιθανές διαδρομές της ροής θερμότητας μέσα από τα πιθανά υλικά που συνθέτουν τον ημιαγωγό και το γύρω περιβάλλον του όπως φαίνετια στο σχήμα 13. Καθίσταται λοιπόν απαραίτητη η θερμική ανάλυση για τα σημεία λειτουργίας των ημιαγωγών έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η ροή θερμότητας προς το περιβάλλον ώστε να λειτουργήσει αποδοτικότερα και ασφαλέστερα η διάταξη των ηλεκτρονικών ισχύος.

Σχήμα 13: Απεικόνιση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας σε έναν ημιαγωγό [?]

5.1.1 Αγωγή

Το φαινόμενο της αγωγής όπως περιγράφεται από το νόμο του Fourier σε μία διάσταση απεικονίζεται στο σχήμα 14 [?]. Αιτία του φαινομένου είναι η διαφορά θερμοκρασίας που σχηματίζεται στο εσωτερικό του στερεού ενώ σε μικροσκοπικό επίπεδο εκφράζεται από την τυχαία κίνηση των ατόμων και των μορίων.Η ροή της θερμότητας είναι ανάλογη της επιφάνειας, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k και της διαφοράς θερμοκρασίας $T_1 - T_2$ και εκφράζεται από τον τύπο :

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{x} \tag{17}$$

Όπου:

- Q είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας (σε W),
- k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού (σε W/m·K),
- Α είναι η διατομή (σε m²),
- $T_1 T_2$ είναι η διαφορά θερμοκρασίας (σε K),
- x είναι το πάχος του υλικού (σε m).

Σχήμα 14: Μεταφορά θερμότητας : αγωγή [?]

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εκφράζει μια φυσική ιδιότητα ενός υλικού και προσδιορίζει την ικανότητά του να μεταφέρει θερμότητα. Όσο υψηλότερη τιμή του συντελεστή τόσο καλύτερος αγωγός θερμότητας είναι το υλικό αυτό. Η μαθηματική έκφραση για τη θερμική αγωγιμότητα είναι :

$$R_{\theta} = \frac{T_1 - T_2}{Q} \tag{18}$$

5.1.2 Συναγωγή

Το φαινόμενο της συναγωγή όπως αυτό περιγράφεται από το νόμο του Νεύτωνα για τη ψύξη αφορά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και ενός παρακείμενου ρευστού και απεικονίζεται σε μία διάσταση στο σχήμα 15 [?]. Ο νόμος ορίζει ότι ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός παρακείμενου ρευστού είναι ανάλογος του εμβαδού της επιφάνειας και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του ρευστού ακριβώς έξω από ένα θερμικό σύνορο (μια περιοχή εντός της οποίας η θερμοκρασία μεταβάλλεται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας στη θερμοκρασία του ρευστού). Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι εν γένει αυτός της αγωγής εφόσον η θερμότητα ρέει στο σύνορο του ρευστού με το στερεό και έχει κατεύθυνση όπως ορίζεται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο υλικών. Ο συντελεστής συναγωγής h λαμβάνει τιμές ανάλογα με τον τύπο του ρευστού (υγρό ή αέριο) και με το κατάσταση της ροής του ρευστού (εξαναγκασμένη ή ελεύθερη). Σχετικές τιμές για την εξαναγκασμένη ροή σε αέρια είναι. Η μαθηματική σχέση που διέπει τη συναγωγή είναι :

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \tag{19}$$

- Q είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (σε W),
- h είναι ο συντελεστής συναγωγής (σε W/m²·K),
- Α είναι η διατομή (σε m²),
- T_s είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας (σε K),
- T_f είναι η θερμοκρασία του ρευστού (σε K).

Όπως και στην θερμική αγωγή έτσι και στη συναγωγή εισάγεται ένας συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ο οποίος είναι αντιστρόφως ανάλογος του συντελεστή συναγωγής και της επιφάνειας και εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο :

$$R_{\theta} = \frac{1}{h \cdot A} \tag{20}$$

Σχήμα 15: Μεταφορά θερμότητας : συναγωγή[?]

Η συναγωγή όπως θα φανεί και στη συνέχεια μπορεί να παίξει ενεργό ρόλο στις στη μοντελοποίηση της θερμιδομετρικής διάταξης. Εντούτοις για διευκόλυνση της προσομοίωσης δεν προχωρήσαμε στην εισαγωγή των εξισώσεων στην ανάλυση μας.Όπου απαιτείται έχει γίνει η θεώρηση ότι η ροή του ρευστού είναι ομογενής και η κατανομή της θερμοκρασίας στα τοιχώματα είναι σχεδόν όμοια λόγω συμμετρίας.

5.1.3 Ακτινοβολία

Το φαινόμενο της ακτινοβολίας είναι το τελευταίο στοιχείο ώστε να περιγραφεί πλήρως η μεταφορά της θερμότητας. Ο μηχανισμός της ακτινοβολίας είναι θεμελιωδώς διαφορετικός από αυτόν της αγωγής [?]. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά θερμότητας είναι το αποτέλεσμα της μεταφοράς ενέργειας που σχετίζεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή φωτόνια, η οποία δεν απαιτεί μέσο διάδοσης, ενδεικτικά το σχήμα 16. Ορίζουμε ως μαύρο σώμα αυτό που απορροφά όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν πάνω του. Η ικανότητα ενός αντικειμένου να απορροφά φωτόνια συνδέεται στενά με την ικανότητά του να παράγει (εκπέμπει) φωτόνια. Ο νόμος Stefan-Boltzmann ορίζει ότι η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα με επιφάνεια Α και απόλυτη θερμοκρασία Τ δίνεται από τη μαθηματική έκφραση :

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_f^4) \tag{21}$$

Όπου:

- Qείναι ο ρυθμός εκπομπής θερμότητας (σε W),
- ε είναι η εκπομπή της επιφάνειας (χωρίς μονάδες),
- σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann $5.67\times 10^{-8}\,{\rm W/m^2}\cdot{\rm K}^4$
- Α είναι η διατομή της επιφάνειας (σε m²),
- Tείναι η θερμοκρασία της επιφάνειας (σε K),
- T_f είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (σε K).

Σχήμα 16: Μεταφορά θερμότητας : ακτινοβολία [?]

5.2 Θερμικά κυκλώματα RC

Η θερμική συμπεριφορά των στοιχείων ημιαγωγών μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος: Το κύκλωμα τύπου Τ όπως απεικονίζεται στο σχήμα 17, αντικατοπτρίζει την πραγματική, φυσική διάταξη του ημιαγωγού με βάση τις θερμικές χωρητικότητες με ενδιάμεσες θερμικές αντιστάσεις. Το μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί όταν τα χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρωμάτων είναι γνωστά, ωστόσο, η σωστή απεικόνιση της θερμικής εξάπλωσης στα επιμέρους στρώματα είναι μία περίπλοκη διαδικασία. Τα επιμέρους στοιχεία RC μπορούν να αντιστοιχιστούν στα επιμέρους στρώματα της διάταξης του ημιαγωγού. Οι κόμβοι του δικτύου επιτρέπουν επομένως την πρόσβαση στις εσωτερικές θερμοκρασίες της ακολουθίας των στρωμάτων που συνθέτουν έναν διακόπτη ισχύος. [?]

Σχήμα 17: Θερμικό κύκλωμα RC τύπου Τ

Όπως και στα ηλεκτρικά κυκλώματα τα στοιχεία των θερμικών RC κυκλωμάτων αντιστοιχούν σε παρόμοιες φυσικές έννοιες. Το ανάλογο της αντίστασης είναι η θερμική αγωγιμότητα, τον συντελεστή εκείνο που υποδεικνύει εάν ένα υλικό είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Ο πυκνωτής εκφράζει στα θερμικά κυκλώματα την θερμοχωρητικότητα, μέγεθος απευθείας συνδεδεμένο και με την έννοια της χωρητικότητας. Η τάση εδώ αποτυπώνει τη θερμοκρασία ενώ ένταση την εν γένει θερμότητας στο κύκλωμα.

5.3 Επιλογή τύπου θερμιδομετρικής διάταξης

Οι θερμιδομετρικές διατάξεις που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία θα αναλύσω εν συντομία προκειμένου να διασαφηνιστεί η επιλογή που έγινε για το σκοπό αυτής της εργασίας.Τα αντικειμενικά ζητήματα που έπρεπε να επιλυθούν κατά την πρώιμη αναζήτηση του τύπου της διάταξης και επομένως και οι λύσεις τους περιελάμβαναν τα εξής βασικά κριτήρια :

- Ακρίβεια στις μετρήσεις των απωλειών, η οποία να προκύπτει από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και να γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία.
- Η ύπαρξη εργαστηριακού και ηλεκτρολογικής ή μηχανολογικής φύσεως εξοπλισμού στην κατοχή του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος στο οποίο και υλοποιήθηκε η εργασία αυτή.
- Πολυπλοκότητα διάταξης για την οποία λήφθηκε υπόψη πρότερη εμπειρία και δυνατότητα του φοιτητή για την ανάπτυξη λογισμικού ελέγχου,καταγραφής και απεικόνισης καθώς και η ύπαρξη των απαραίτητων εργαλείων και τεχνογνωσίας στην απόκτηση,σχεδίαση και εφαρμογή των επιμέρους συστημάτων ανταλλαγής θερμότητας.
- Οι διαθέσιμες συσκευές προς μέτρηση καθώς και ο όγκος τους, ώστε να προσδιοριστεί ο τελικός όγκος της διάταξης.

Η διάταξη που απομονώθηκε από την σταχυολόγηση των δυνατών επιλογών είναι η θερμιδομετρική διάταξη κλειστού τύπου διπλού κελύφους (double-jacket). Η διάταξη αυτή παρουσιάζει πολυπλοκότητα στην κατασκευή καθώς αποτελείται από δύο κελύφη,που το ένα επικαλύπτει το άλλο με σκοπό να απομονώνεται το διάκενο μεταξύ τους και να μπορεί να ελεγχθεί εκεί η θερμοκρασία του,ενώ και το κύκλωμα ψύξης και θέρμανσης αυξάνουν τη δυσκολία αλλά και το κόστος της εγκατάστασης.Εντούτοις οι διατάξεις κλειστού τύπου εμφανίζουν την υψηλότερη ακρίβεια στον υπολογισμό των απωλειών ενώ ο έλεγχος του κλίματος στο οποίο βρίσκεται η συσκευή προς δοκιμή επιτρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες καθώς και να απομονωθούν οι όποιες επιδράσεις προκύπτουν από εξωγενείς παράγοντες και επηρεάζουν τις δοκιμές.

5.4 Περιγραφή της διάταξης

5.4.1 Κατασκευή

Η θερμιδομετρική διάταξη κλειστού τύπου, συνίσταται από δύο κουτιά που αποτελούνται από μονωτικό υλικό της πολυστερίνης. Στο εσωτερικό βρίσκεται η συσκευή προς δοκιμή, ο εναλλάκτης αέρα νερού και στερεωμένος σε αυτόν αξονικός ανεμιστήρας παρόμοιων διαστάσεων με τον εναλλάκτη προκειμένου να υπάρχει βεβιασμένη ροή αέρα και έτσι να μειωθεί η σταθερά χρόνου του πειράματος. Στο ενδιάμεσο διάκενο, είναι εγκατεστημένοι 16 ανεμιστήρες που διασφαλίζουν την ομογενή κυκλοφορία του αέρα.Στη μία πλευρά του εξωτερικού κελύφους υπάρχουν δύο οπές οι οποίες χρησιμοποιούνται για εισαγωγή και την εξαγωγή θερμού αέρα.

Για τη λειτουργία της θερμιδομετρικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε για ψυκτικό μέσο το απιονισμένο νερό.Για τον υπολογισμό της ροής της μάζας του νερού επίσης έγινε η υπόθεση :

$$1ml = 1g$$

νερού, επιτρέποντας μας να εξάγουμε το μέγεθος αυτό μετρώντας τη ροή μέσω ενός αισθητήρα ροής όπως περιγράφεται και παρακάτω.

Οι παρακάτω μηχανολογικές όψεις, βοηθούν στην κατανόηση της σύντομης αυτής περιγραφής. Το δύο κελύφη κατασκευάστηκαν από φύλλα πολυστερίνης για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, κλείνουν αεροστεγώς με πλαίσια κατάλληλων διαστάσεων και απομονώνουν θερμικά και απομονώνουν τους χώρους στους οποίους βρίσκεται η συσκευή προς δοκιμή και τον όγκο του διακένου από τον περιβάλλονται χώρο.Επιτυγχάνεται έτσι η θερμική απομόνωση του εσωτερικού όγκου στον οποίο γίνονται οι δοκιμές με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η επιρροή από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ακόμα εξωτερικά της κατασκευής, συναρμολογήθηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο το ψυκτικό κύκλωμα για τη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό που βρίσκεται η συσκευή στον εναλλάκτη και η πλακέτα ελέγχου μαζί με όλα τα αισθητήρια. Ο έλεγχος και η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκαν από έναν DSP μικροεπεξεργαστή αρχιτεκτονικής 32-bit σε γλώσσα C. Η εφαρμογή λήψης των δεδομένων και αποθήκευσης τους στον υπολογιστή υλοποιήθηκε σε γλώσσα Python. Για τις ανάγκες της διπλωματικής δημιουργήθηκε διεπαφή στην οποία ο χρήστης μπορεί να βλέπει σε πραγματικό χρόνο την πορεία της μέτρησης των απολειών.

Σχήμα 18: Πρόσοψη και πλάγια όψη δοκιμίου

5.5 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Το υλικό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των κιβωτίων είναι η πολυστερίνη. Για την επιλογή του πάχους της μόνωσης έπρεπε να λάβουμε υπόψη την επιβολή ,στα φαινόμενα που μελετά η εργασία , της θερμοχωρητικότητας.Η επιλογή μεγαλύτερου πάχους μόνωσης έστω 100mm και για τα δύο κελύφη θα οδηγούσε σε λιγότερες διαφεύγουσες απώλειες από τα τοιχώματα. Εντούτοις ταυτόχρονα θα αυξανόταν αρκετά η θερμοχωρητικότητα καθώς και το βάρος της κατασκευής. Επιπλέον ο χρήσιμος όγκος θα μειωνόταν για τις ίδιες διαστάσεις και θα αυξανόταν και το κόστος απόκτησης του υλικού. Τελικά δεδομένου ότι για τη διάταξη έχει προδιαγραφεί ενεργός έλεγχος της θερμοκρασίας διακένου ούτως ώστε να εξαλείφονται οι απώλειες από τα τοιχώματα, προχωρήσαμε στην επιλογή 50mm πολυστερίνης για το εξωτερικό κέλυφος και 30mm για το εσωτερικό.Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή των φύλλων πολυστερίνης τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι [?]:

Σχήμα 19: Συνοπτική απεικόνιση συστήματος

- Θερμική αγωγιμότητα: $\lambda = 0.033$ W/mK
- Θερμική αντίσταση: $R_d = 1.50 \text{ m}^2 \text{K/W}$ για ονομαστικό πάχος 50mm Δηλαδή σε ένα τετραγωνικό μέτρο $R_d = 1.5 \text{ m}^2 \text{K/W}$
- Μέγιστη Θερμοκρασία Λειτουργίας: max $\,+\,75^{\circ}\mathrm{C}$
- Πυκνότητα: 32 kg/m^3

Το υλικό αυτό επιλέχθηκε λόγω των πολύ καλών του μονωτικών ιδιοτήτων και της στιβαρότητας, καθώς και της ευκολίας επεξεργασίας του. Η πολυστερίνη είναι ένα εύφλεκτο υλικό και για αυτό το λόγο πάρθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία του χειριστή και των οργάνων μέτρησης.

5.5.1 Διαστάσεις της διάταξης

Με τη χρήση των παραπάνω στοιχείων, προχωρήσαμε στο υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων και των θερμικών χωρητικοτήτων της διάταξης με στόχο να χρησιμοποιηθούν αργότερα και εάν αυτό απαιτηθεί, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων και την περαιτέρω διερεύνηση μέσω προσομοίωσης.

Σχήμα 20: Φωτογραφία της διάταξης κατά την κατασκευή

Σχήμα 21: Προτεινόμενο θερμικό κυκλωματικό ισοδύναμο της διάταξης.

Τα χαρακτηριστικά της διάταξης όπως προέκυψαν μετά το πέρας της κατασκευής και σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο και γενικά χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

Περιγραφή	Συνολική επιφάνεια	Όγκος	Θερμική Αντίσταση	Θερμική Χωρητικότητα
Εξωτερικό Κουτί	4.5 m^2	0.23 m ³	0.3264 K/W	10657 J/K
Εσωτερικό Κουτί	2.28 m ²	0.1212 m ³	0.6450 K/W	5626 J/K
Όγκος Διακένου	-	0.3 m ³	-	347 J/K
Όγκος Εσω. Κουτιού	-	0.23 m ³	-	275 J/K

Πίνακας 3: Επιφάνεια, Όγκος και θεωρητικά θερμικά χαρακτηριστικά

5.6 Υλοποίηση του συστήματος αντιστάθμισης

Θεωρώντας ότι η κατανομή της θερμοκρασίας στον όγκο του αέρα είναι ομοιόμορφη μετά την παρέλευση σύντομου χρονικού διαστήματος, η ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας μεταξύ του όγκου που γίνεται η μέτρηση των απωλειών και του διακένου χωρίς να υπάρχει αντιστάθμιση αποτυπώνεται γραφικά στην παρακάτω προσομοίωση. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ansys και επιλέχθηκαν οι προσομοιώσεις θερμικής ισορροπίας (ή μόνιμης κατάστασης) και μεταβατικής.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για μία λειτουργική κατάσταση, όπου τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα του εσωτερικού κουτιού έχουν διαφορά θερμοκρασίας 15°C, φαίνονται παρακάτω:

Σχήμα 22: Θερμική προσομοίωση της συσκευής σε μεταβατική κατάσταση

Η διαφορά αυτή προκαλεί μία θερμική ροή της τάξης των 17.702 W/m². Δεδομένου ότι η εξωτερική επιφάνεια έχει εμβαδόν 2.44 m², μπορούμε να υπολογίσουμε από τον τύπο:

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T}{\mathbf{Q} \times \text{Surface}}$$
(22)

την τιμή της ισοδύναμης αντίστασης του εσωτερικού κελύφους ως εξής:

$$R_{\text{thermal}} = \frac{55 - 40}{8.82 \times 2.44} = 0.6970 \text{ °C/W}$$
(23)

Η διαφορά της αναλυτικά υπολογισμένης θερμικής αντίστασης του εσωτερικού κελύφους και αυτής που προέκυψε από την προσομοίωση είναι στα 0.052° C/W

Σχήμα 23: Θερμική προσομοίωση της συσκευής σε μόνιμη κατάσταση

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, υλοποιήθηκε ένα σύστημα που αποσκοπεί στην παρακολούθηση της θερμοκρασίας στον όγκο που τελείται το πείραμα και στην επιβολή της ίδιας θερμοκρασίας στο διάκενο με τη χρήση ενός θερμαντικού στοιχείου. Το θερμαντικό στοιχείο που επιλέχθηκε είναι μια αντίσταση 1500 W η οποία εισάγει και εξάγει αέρα στο διάκενο μέσω δύο οπών. Το σύστημα είναι κλειστό, αφού ο αέρας δεν επιτρέπεται να εισέλθει από άλλο σημείο στο υπό θέρμανση διάκενο.

Σχήμα 24: Κύκλωμα triac

Σχήμα 25: Τυπωμένο κύκλωμα

Ο θερμός αέρας, αν και εισέρχεται με ταχύτητα, η διάχυση του στο διάκενο, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στη θερμοκρασία διακένου, υποβοηθείται από ανεμιστήρες που είναι τοποθετημένοι

κατάλληλα. Η θερμοκρασία δειγματοληπτείται κάθε 3 δευτερόλεπτα από ένα σημείο στο διάκενο.

Προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή παρακολούθηση της θερμοκρασίας αέρα του εσωτερικού δοκιμίου, υλοποιήθηκε ελεγκτής PI. Η έξοδος του ελεγκτή τροφοδοτείται ως εύρος παλμού (duty cycle) σε ένα κύκλωμα ελέγχου μονοφασικού φορτίου με TRIAC που σχεδιάστηκε για αυτό το σκοπό. Για τη υλοποίηση του ελέγχου είναι αναγκαία η γνώση του σημείου μηδενισμού της μονοφασικής τάσης και ο συγχρονισμός του παλμού έναυσης της triac με τον μηδενισμό. Για αυτό το λόγο γίνεται πολλαπλές φορές ανανέωση του εύρους παλμού, καθώς η είσοδος έχει πιο αργή απόκριση.

Όπως φαίνεται και παρακάτω από τα δεδομένα που εξάχθηκαν κατά τα πειράματα η παρακολούθηση της εσωτερικής θερμοκρασίας από το σύστημα ελέγχου είναι ικανοποιητική, ενώ η απόκριση του συστήματος αντιστάθμισης δεν επηρεάζει τη μέτρηση των απωλειών αφού αυτές λαμβάνονται αργότερα από το θερμικό μεταβατικό.

Σχήμα 26: Θερμοκρασίες : Εσωτερική, Διακένου, Εξωτερική

5.7 Κύκλωμα ψύξης και κυκλοφορίας

5.7.1 Ψυκτικό κύκλωμα

Στις θερμιδομετρικές διατάξεις κλειστού τύπου η παραγόμενη ισχύς σε μορφή απωλειών από τη συσκευή υπό μέτρηση, πρέπει να εξαχθεί με τη χρήση ενός δευτερεύοντος κυκλώματος προς το περιβάλλον, εφόσον το πρωτεύον θερμικό κύκλωμα στο οποίο ανήκει η συσκευή έχει από την κατασκευή απομονωθεί θερμικά από αυτό. Ως περιβάλλον ονομάζω το ανοιχτό σύστημα στο οποίο απάγεται τελικά η θερμότητα που παράγεται εσωτερικά στο δοκίμιο και είναι απομονωμένο από αυτό. Για την απαγωγή της θερμότητας που παράγει το δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε αντλία θερμότητας τος της οποίας η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο φαινόμενο Peltier – Seebeck.

Η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου παρέχει τεχνική διευκόλυνση κατά την προσαρμογή και τον έλεγχο της και η επέκταση της ψυκτικής ισχύος είναι συγκριτικά ευκολότερη από των συμβατικών συστημάτων. Εντούτοις η μέθοδος αυτή υστερεί σε απόδοση (<50% της απορροφούμενης ονομαστικής ισχύος έναντι των συμβατικών μεθόδων ψύξεως και συνεπώς η χρήση της συνίσταται σε πολύ χαμηλά φορτία [?]. Η αντλία θερμότητας συνδέεται με έναν εναλλάκτη αέρα – νερού. Στον εναλλάκτη πραγματοποιείται η μεταφορά της θερμότητας που παράγεται λόγω των απωλειών στο εσωτερικό του δοκιμίου στο ψυκτικό μέσο, νερό, το οποίο ρέει μέσω των αγωγών. Για την αποφυγή εμφάνισης υγρασίας εντός του πειράματος, η ελάχιστη θερμοκρασία του νερού τίθεται στους 20°C. Ενδείκνυται και χρησιμοποιείται ένα δοχείο αδράνειας προκειμένου να υπάρχει εξασφαλιστεί ο όγκος νερού διαθέσιμος κάθε στιγμή για τη δοκιμή.

5.7.2 Κυκλοφορητής

Η κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου(απιονισμένο νερό) επιτυγχάνεται με τη χρήση του κυκλοφορητή DC30A-1230.Το επιδιωκόμενο εύρος της τιμής της ροής για τη διεξαγωγή των μετρήσεων καθορίστηκε στα 100-130ml/min. Σε αυτό το εύρος πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές λειτουργία και βαθμονόμησης της συσκευής. Δεδομένων των χαρακτηριστικών της αντλίας, η ροή λόγω της λειτουργίας της αντλίας στην ονομαστική της τάση 12Vdc και για το εγκατεστημένο υδραυλικό κύκλωμα μετρήθηκε στα 700ml/min. Για την επίτευξη του παραπάνω εύρους τιμών της ροής του μέσου, μείωθηκε η τάση λειτουργίας της στα 5V και συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκε και μια σφαιρική βάνα (ball valve) στην αναρρόφηση της αντλίας.

5.7.3 Αισθητήρας ροής

Η μέτρηση της απορροφούμενη ισχύος από τη θερμιδομετρική διάταξη προκύπτει:

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{24}$$

από το γινόμενο της ροής επί τη διαφορά θερμοκρασίας επί τη θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου. Καθίσταται λοιπόν προαπαιτούμενη η ακριβής και συνεχόμενη μέτρηση της ροής για την επίτευξη ακρίβειας καθώς και επαναληψιμότητας στην εξαγωγή των απωλειών της εκάστοτε συσκευής προς δοκιμή. Ο αισθητήρας ροής που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό είναι ο OF05ZAT-AR. Πρόκεται για έναν αισθητήρα κατάλληλο για μετρήσεις θερμού / κρύου νερού, με έυρος μετρούμενης ροής 50ml/min έως 850ml/min, σε ιξώδες από 0.8 - 2 mPa*s και ακρίβεια $\pm 2\% RS$.

Σχήμα 27: Χαρακτηριστικές διαφοράς θερμοκρασίας προσαγωγής - επιστροφής και ροής

5.7.4 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Τα αισθητήρια θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου NTC.Στη διάταξη μετρώνται πέντε συνολικά θερμοκρασίες. Τα αισθητήρια ανάλογα με το κέλυφος τους διαχωρίζονται σε αυτά με μεταλλικό κέλυφος και τοποθετούνται σε άμεση επαφή με κάποιο μέταλλο ή εμβαπτίζονται και σε αυτά με πλαστικό κέλυφος τα οποία και τοποθετήθηκαν ώστε να μετράνε τον αέρα. Τα αισθητήρια θερμοκρασίας που χρησιμοποιήσαμε για την εργασία έχουν ακρίβεια 1% στην αντίσταση τους στους 25 °C [?]. Καθώς οι αισθητήρες αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας έχουν μια μη γραμμική σχέση αντίστασης και θερμοκρασίας, έγινε η επιλογή υλοποίησης κυκλώματος τέτοιου ώστε να ενισχυθεί το εύρος τιμών που ήταν χρήσιμο για την περίπτωση μας αλλά και να δοθεί μια γραμμική σχέση τάσης θερμοκρασίας, ώστε να ελαχιστοποιηθεί οποιοδήποτε σφάλμα κατά την επεξεργασία.[?]

Σχήμα 28: Κύκλωμα διαμόρφωσης θερμοκρασίας

5.8 Έλεγχος και δειγματοληψία

Για την ανάγκη του έλεγχου των συστημάτων,της δειγματοληψίας και τις επικοινωνίας με τον υπολογιστή σχεδιάστηκε τυπωμένο κύκλωμα (PCB). Ο επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία των σημάτων θερμοκρασίας στο 1kHz μέσω κυκλώματος ενισχυτών για τον έλεγχο του κυκλοφορητή μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού με διακριτά στοιχεία, καθώς και με ηλεκτρονόμους για τον έλεγχο των ψυκτικών κυκλωμάτων. Επίσης στον επεξεργαστή υλοποιείται ο έλεγχος με PI της αντιστάθμισης μέσω του TRIAC. Για την ανάπτυξη του λογισμικού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα C και όλες οι ρουτίνες γράφτηκαν από την αρχή. Στη μεταφορά των δεδομένων χρησιμοποιείται το DMA ενώ η σύνδεση στον υπολογιστή είναι σειριακή. Στον επεξεργαστή έχουν συμπληρωματικά υλοποιηθεί ρουτίνες για την προστασία του εξοπλισμού ενώ επίσης σε περίπτωση σφάλματος διακόπτεται η δοκιμή και ενημερώνεται ο χρήστης για το αίτιο του προβλήματος μέσω της διεπαφής.

Σχήμα 29: Κύκλωμα με τον επεξεργαστή

Σχήμα 30: Τυπωμένο κύκλωμα ελεγκτή της θερμιδομετρικής διάταξης

6 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειράματα που απεικονίζονται στην παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας βαθμονόμησης της συσκευής με ωμικής αντίσταση. Η διάταξη όπως και κάθε άλλη θερμιδομετρική διάταξη διαθέτει αυξημένη θερμοχωρητικότητα λόγω του όγκου μονώσεως που διαθέτει. Ως αποτέλεσμα οι χρόνοι του κάθε πειράματος έχουν μεγάλη διάρκεια έως ότου επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Συνέπεια ακόμα του γεγονότος της υψηλής τιμής της θερμοχωρητικότητας είναι πως ως ορθή χρήση της συσκευής καθορίζεται η επαλληλία δοκιμών αυξανόμενης ισχύος, δηλαδή μία δοκιμή των 20W θα την ακολουθήσει μια δοκιμή μεγαλύτερης ισχύος. Έχοντας ως γνώμονα τα παραπάνω στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης καθώς και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

6.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε ωμικό φορτίο το οποίο τροφοδοτούταν με συνεχές ρεύμα και τάση. Η τάση και το ρεύμα εισόδου καταγραφόταν στην αρχή του πειράματος από τις ενδείξεις του τροφοδοτικού και υπήρχε τακτικός έλεγχος των τιμών του ρεύματος και της τάσης εισόδου προκειμένου να διασφαλιστεί η τιμή της αποδιδόμενης ισχύος από αλλαγή της αντίστασης λόγω θέρμανσης της. Η ροή του ψυκτικού μέσου έπειτα από τη δειγματοληψία και την αποθήκευση της απεικονιζόταν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Για την επίσπευση των δοκιμών η θερμοκρασία εκκίνησης του ισοδυναμούσε με αυτή της ηρεμίας πριν από την έναρξη. Η ενεργός αντιστάθμιση για που αφορούσε το μηδενισμό των απωλειών μέσω των εσωτερικών τοιχωμάτων ήταν σε συνεχή λειτουργία και ελεγχόταν από έναν ελεγκτή PI ώστε να διασφαλίζεται η όσο το δυνατόν καλύτερη αντιστοίχηση με την εσωτερική θερμοκρασία. Για τη μείωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος ο ανεμιστήρας του εναλλάκτη ήταν εξαρχής ανοικτός. Οι ψύκτες ενεργοποιούταν από τον ελεγκτή και λειτουργούσαν με έλεγχο υστέρησης έχοντας πολύ μικρά όρια γύρω από την τιμή της ζητούμενης τιμής του νερού για να αποφευχθούν οι κυματώσεις του νερού εισόδου.

6.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις που προέκυψαν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Η ακρίβεια σε χαμηλές ισχύς < 10W όπβε προκύπτει από τα δεδομένα αλλά και όπως αναμενόταν από τη σχεδίαση της συσκευής δεν είναι ικανοποιητική, ενώ για τιμές από

15 W < Pm < 55 W, όπου Pm είναι η μετρούμενη ισχύς, η το ελάχιστο σφάλμα βρίσκεται στο 1.44% και το μέγιστο δεν ξεπερνά το 5%. Επιπρόσθετα η επαναληψιμότητα των μετρήσεων φαίνεται να υποστηρίζεται από τις μετρήσεις. Παρακάτω ακολουθεί ο σχολιασμός των μετρήσεων.

6.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

Οι μετρήσεις λήφθηκαν από τον μικροεπεξεργαστή με συχνότητα δειγματοληψίας 1kHz. Οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών αποστέλλονταν στο πρόγραμμα διαμόρφωσης και απεικόνισης στον υπολογιστή με συχνότητα 1Hz. Στην πλευρά του ενσωματωμένου συστήματος εφαρμόσθηκε ψηφιακό φίλτρο κινούμενου μέσου 16 θέσεων στη συχνότητα της δειγματοληψίας. Στην πλευρά του υπολογιστή δεν εφαρμόσθηκε κανένα ψηφιακό φίλτρο.

6.4 Δοκιμές 20W

Οι δοκιμές αυτές (31α',31β') αποτελούν προσπάθειες έλεγχου της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Οι δοκιμές δεν έγιναν υπό τις ίδιες κλιματικές συνθήκες και η ροή του νερού δεν παρέμεινε

σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος του σχήματος. Οι δύο μετρήσεις ακολούθησαν διαφορετική απόκριση όπως ήταν αναμενόμενο ωστόσο η μέτρηση είναι ικανοποιητική. Στη δοκιμή του σχήματος 31α' παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι θετική και οι θερμοκρασίες βάσης σημειώνουν άνοδο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω διακύμανσης της ροής του νερού και της ανόδου της εξωτερικής θερμοκρασίας καθώς αλλάζει και η τιμή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Ωστόσο παρατηρείται ότι η μετρούμενη ισχύς έχει πτωτική τάση. Αυτό επιβεβαιώνει την μείωση της τιμής της ροής. Η άνοδος της θερμοκρασίας επιστροφής δεν φαίνεται ότι επηρεάζεται άμεσα λόγω της θερμικής αδράνειας καθώς ξεκινά το θερμικό μεταβατικό,οπότε και η τιμή της ισχύς θα παρουσιάζει κάποια διακύμανση, η οποία οφείλεται στον έλεγχο του ψυκτικού κυκλώματος με τη μέθοδο του βρόχου υστέρησης. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, παρουσιάζουν αρχικά διαφορά στη θερμοκρασία. Το σύστημα αντιστάθμισης ακολουθεί την εσωτερική θερμοκρασία. Η μεταβολή είναι αργή λόγω του όγκου του αέρα και της μικρής αρχικής διαφοράς των θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στη μικρή διαφορά των αρχικών τιμών της εσωτερικής και της θερμοκρασίας στο διάκενο.

Στη δοκιμή του σχήματος 31β' παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής. Η διαφορά που γίνεται αντιληπτή οφείλεται στις απώλειες των αγωγών από το δοχείο μέχρι τη θέση του αισθητηρίου θερμοκρασίας προσαγωγής.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι σταθερή. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω διακύμανσης της ροής του νερού. Ωστόσο παρατηρείται ότι η μετρούμενη ισχύς έχει σταθερή τάση. Σε αυτή την περίπτωση η διακύμανση της ροής είναι πολύ μικρή και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων.Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 1°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο της μέτρησης και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 17/08/2024 | File: Χαμηλή ροή 20.1W_mean.xlsx

Date: 16/08/2024 | File: Δοκιμή 20W_mean.xlsx

Σχήμα 31: Ζεύγος δοκιμών ισχύς εισόδου 20W

6.5 Δοκιμή 28.2W

Στη δοκιμή του σχήματος 32 παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι θετική. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω διακύμανσης της ροής του νερού. Ωστόσο παρατηρείται ότι η μετρούμενη ισχύς έχει πτωτική τάση. Αυτό επιβεβαιώνει την μείωση της τιμής της ροής καθώς ξεκινά το θερμικό μεταβατικό,οπότε και η τιμή της ισχύς θα παρουσιάζει κάποια διακύμανση, η οποία οφείλεται στον έλεγχο του ψυκτικού κυκλώματος με τη μέθοδο του βρόχου υστέρησης. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 1°C. Η διαφορά είναι μικρή πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο των μετρήσεων και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 17/08/2024 | File: Πολυ χαμηλή ροή 28.2W_mean.xlsx

Σχήμα 32: Δοκιμή 28.28W

6.6 Δοκιμή 30.62W

Στη δοκιμή του σχήματος 33 παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής.Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσα-γωγής. Η ροή του νερού στο πείραμα αυτό έχει κρατηθεί υψηλή και η τιμή της παρέμεινε σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Σημειώνεται ότι το δοχείο αδρανείας έχει την ίδια θερμοκρασία με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπου η τελευταία διατηρείται σταθερή αφού ο χώρος κλιματίζεται.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι η μετρούμενη ισχύς έχει σταθερή τάση. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 1°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο των μετρήσεων και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 16/08/2024 | File: Δοκιμή 30.62W_mean.xlsx

Σχήμα 33: Δοκιμή βαθμονόμησης στα 30.62W

6.7 Δοκιμές 40.4W

Οι δοκιμές αυτές (34β',34β') αποτελούν προσπάθειες έλεγχου της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Οι δοκιμές δεν έγιναν υπό τις ίδιες κλιματικές συνθήκες και η ροή του νερού δεν παρέμεινε σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος του σχήματος. Οι δύο μετρήσεις ακολούθησαν διαφορετική απόκριση όπως ήταν αναμενόμενο ωστόσο η μέτρηση είναι ικανοποιητική. Στη δοκιμή του σχήματος 34α' παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής. Η ροή του νερού προκύπτει και από τις μετρήσεις ότι είναι σταθερή. Επιπλέον παρατηρείται πως η θερμοκρασία του νερού στο δοχείο αδρανείας είναι εναγκαλισμένη με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό όπως προκύπτει βοηθά στην εξομάλυνση των κυματώσεων που δημιουργούνται από τον έλεγχο της θερμοκρασίας.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι οιονεί σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος,αφού η κυμάτωση της φαίνεται να γίνεται γύρω από μία τιμή. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα στο διάκενο και στο εσωτερικό της συσκευής παρουσιάζουν μικρή διαφορά περίπου 0.5°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα προέρχεται από το θόρυβο της μέτρησης και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Στη δοκιμή του σχήματος 34β' παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσα-γωγής. Η ροή του νερού προκύπτει και από τις μετρήσεις ότι είναι σταθερή. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του νερού είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχουν κυματώσεις στη θερμοκρασία του νερού λόγω και της μεθόδου ελέγχου της θερμοκρασίας του μέσω ελέγχου υστέρησης.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι οιονεί σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος,αφού η κυμάτωση της φαίνεται να γίνεται γύρω από μία τιμή. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου. Το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα στο διάκενο και στο εσωτερικό της συσκευής παρουσιάζουν μικρή διαφορά μικρότερο 0.5°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα προέρχεται από το θόρυβο της μέτρησης και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 16/08/2024 | File: Δοκιμή 40.4W_mean.xlsx

Date: 18/08/2024 | File: Poń 40.4W_mean.xlsx

Σχήμα 34: Ζεύγος δοκιμών σε όμορη ή ίδια τιμή ισχύος εισόδου

6.8 Δοκιμή 45W

Στη δοκιμή του σχήματος 35 παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής.Η ροή του νερού στο πείραμα αυτό έχει κρατηθεί υψηλή και η τιμή της παρέμεινε σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι η μετρούμενη ισχύς έχει σταθερή τάση. Η τιμή της θερμοκρασίας του δοχείου αδρανείας και της θερμοκρασίας προσαγωγής παρουσιάζουν κυμάτωη η οποία και οφείλεται στον τρόπο ελέγχου της θερμοκρασίας από τον ελεγκτή που υλοποιήθηκε. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 0.5°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο των μετρήσεων και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 18/08/2024 | File: Poń 45W_mean.xlsx

Σχήμα 35: Δοκιμή βαθμονόμησης στα 45W

6.9 Δοκιμή 55W - 1Φ αντίσταση

Στη δοκιμή του σχήματος 36 χρησιμοποιήθηκε μία μονοφασική αντίσταση. Σε μέτρηση που έγινε στο εργαστήριο με βαττόμετρο η αντίσταση ονομαστικά στα 60W μετρήθηκε να έχει ισχύ 55W. Για τη μέτρηση παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του νερού εξόδου διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η θερμοκρασίες προσαγωγής και δοχείου αδρανείας έχουν κοντινές τιμές.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι σταθερή.Προκύπτει και από τις μετρήσεις ότι η ροή του νερου παραμένει σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι η μετρούμενη ισχύς έχει κυμάτωση με μέση τιμή λίγο παραπάνω από τη μετρούμενη τάση. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 1°C και είναι σταθερή σε όλο το πείραμα,ενώ ακολουθεί ικανοποιητικά και το μεταβατικό. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο των μετρήσεων και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.
- Επίσης αξίζει να αναφερθεί και η παρουσία υπερύψωσης. Η απόκριση αυτή είναι πιθανόν να οφείλεται στην αργή απόκριση του συστήματος ψύξης και τη χαμηλή ροή, η οποία καθυστέρησε αρχικά να ανταποκριθεί στην ραγδαία μεταβολή της θερμοκρασίας.

Date: 16/08/2024 | File: Δοκιμή Αντίστασης 55W_mean.xlsx

Σχήμα 36: Δοκιμή βαθμονόμησης στα 55W

6.10 Δοκιμή 50.28W

Στη δοκιμή του σχήματος 37 παρατηρείται :

- Οι θερμοκρασίες του νερού, επιδεικνύουν ορθή λειτουργία της συσκευής. Η θερμοκρασία του δοχείου αδράνειας είναι σε πολύ κοντινή τιμή με τη θερμοκρασία του νερού της προσαγωγής. Η ροή του νερού στο πείραμα αυτό έχει κρατηθεί σταθερή. Επιπλέον η τιμής της θερμοκρασίας του νερού εισόδου είναι και εδώ πολύ κοντά με την τιμή της θερμοκρασίας αέρα, το οποίο ευθύνεται στον περιβάλλοντα χώρο που κλιματίζεται.
- Η κλίση της θερμοκρασίας επιστροφής του νερού είναι σταθερή. Παρατηρείται ακόμη ότι η μετρούμενη ισχύς έχει σταθερή τάση. Η τιμή της θερμοκρασίας του δοχείου αδρανείας και της θερμοκρασίας προσαγωγής παρουσιάζουν κυμάτωη η οποία και οφείλεται στον τρόπο ελέγχου της θερμοκρασίας από τον ελεγκτή που υλοποιήθηκε. Η τιμή που λαμβάνεται ως έξοδος αποτελεί τη μέση τιμή αυτών των διακυμάνσεων. Το κόκκινο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα επιδεικνύει τη τιμή της ισχύος εισόδου.
- Οι θερμοκρασίες του αέρα, επίσης αποτελούν ένδειξη ορθής λειτουργίας. Η εσωτερική θερμοκρασία και η θερμοκρασία διακένου είναι σχεδόν ταυτόσημες παρουσιάζοντας θετική διαφορά κάτω από 1°C. Η διαφορά είναι μικρή και πιθανότατα έγκειται στο θόρυβο των μετρήσεων και δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του αποτελέσματος.

Date: 16/08/2024 | File: Δοκιμή 50.28W_mean.xlsx

Σχήμα 37: Δοκιμή βαθμονόμησης στα 50.28W

6.11 Κατανομή δοκιμών

Στο σχήμα 38 έχουν αποτυπωθεί οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση της θερμιδομετρικής διάταξης της παρούσας εργασίας. Πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω δοκιμές όπως ανεφαίρονται στον πίνακα ?? από τις οποίες δεν παρουσιάζονται όλες γραφικά. Στον πίνακα αποτυπώνονται και οι αποκλίσεις ποσοστιαία μεταξύ μετρούμενης και εισαγόμενης ισχύος στη θερμιδομετρική διάταξη. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν ισχύ από 5W έως 55W. Όπως προκύπτει και από το σχήμα 39 οι μετρούμενες τιμές βρίσκονται κοντά στην ισχύ που χρησιμοποιήθηκε ως "απώλεια" για τη βαθμονόμηση. Η μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζεται στις υψηλότερες ισχύς ωστόσο και για τιμές απωλειών μεγαλύτερων των 20W η θερμιδομετρική διάταξη έχει ακρίβεια < 4.5%. Παρατηρείται ότι ο χρόνος που απαιτείται για την εξαγωγή των απωλειών μπορεί να μειωθεί με τη χρήση βοηθητικών ενεργειών όπως η εξαναγκασμένη ροή αέρα εντός του εσωτερικού κελύφους ώστε να υποβοηθάτε η μεταφορά ισχύος αλλά και η έναρξη του πειράματος κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος βοηθά στην επίτευξη μετρήσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ακόμα προκύπτει η κατασκευή διπλού κελύφους και αντιστάθμισης των απωλειών των τοιχωμάτων βοηθά στην απεμπλοκή από εξωγενείς παράγοντες, αφού οι συνεχόμενες και με διαφορετικά κριτήρια μετρήσεις δεν δείγνουν να διαφοροποιούν το αποτέλεσμα και την α. Καταληκτικά προκύπτει ότι η βαθμονόμηση και η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ορθή και ανεξάρτητη των αρχικών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Σχήμα 38: Απεικόνιση πλήθους δοκιμών και σύγκριση μετρούμενης και εγχεόμενης ισχύος

6.12 Συνάρτηση βαθμονόμησης

Στο σχήμα 39 έχουν αποτυπωθεί οι δοκιμές συναρτήσει της ισχύος εισόδου. Από τις ανάγκες τις βαθμονόμησης προκύπτει και η εξαγωγή μιας μαθηματικής σχέσης με την οποία θα μπορούν κατά τις δοκιμές των απωλειών να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές των εξαγόμενων απωλειών. Έτσι προχωρήσαμε στην πολυωνυμική προσαρμογή των τιμών που λήφθηκαν κατά τις δοκιμές βαθμονόμησης, αγνοώντας τις ακραίες τιμές, έτσι ώστε να έχουμε ένα γραμμικό αποτέλεσμα το οποίο αντιπροσωπεύει και το εύρος της ισχύος που μετράται με ακρίβεια.

Σχήμα 39: Απεικόνιση μετρούμενης και εγχεόμενης ισχύος.

6.13 Ευρετήριο δοκιμών

Στον πίνακα 4 έχουν σταχυολογηθεί σύμφωνα με το όνομα του αρχείου οι δοκιμές της θερμιδομετρικής διάταξης και η σύγκριση των μετρούμενων με των αναμενόμενων τιμών. Οι μετρήσεις έγιναν σε διαφορετικό χρονικό ορίζοντα και τα πειράματα σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες αλλά και ροή, προκειμένου να διαπιστωθεί η ευαισθησία του οργάνου μέτρησης. Σύμφωνα και με τα στοιχεία όπως παρουσιάζοντα παρακάτω, οι δοκιμές δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση από τις προαναφερόμενες αλλαγές.

#	Filename	Wattage (W)	Mean Power (W)
0	Poή 5.7W.csv	5.7	7.38
1	Δοκιμή 10W.csv	10.0	13.68
2	Δοκιμή 19.94W.csv	19.94	19.37
3	Χαμηλή ροή 20.5W.csv	20.5	21.31
4	Πολύ χαμηλή ροή 24.3W.csv	24.3	23.46
5	Χαμηλή ροή 24.3W_01.csv	24.3	23.45
6	Δοκιμή 25.2W.csv	25.2	24.47
7	Χαμηλή ροή 25.28W.csv	25.28	24.41
8	Πολυ χαμηλή ροή 28.2W.csv	28.2	26.99
9	Δοκιμή 30.62W.csv	30.62	31.82
10	Δοκιμή 40.4W.csv	40.4	39.57
11	Ροή 40.4W.csv	40.4	39.59
12	Poή 45W.csv	45.0	43.88
13	Ροή 49.69W.csv	49.69	50.41
14	Δοκιμή 50.28W.csv	50.28	48.32
15	Δοκιμή Αντίστασης 55W.csv	55.0	56.00

7 Επίλογος

7.1 Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός,η κατασκευή και βαθμονόμηση, με ιδία μέσα, της θερμιδομετρικής διάταξης διπλού κελύφους αποτέλεσε τους βασικούς στόχους αυτής της εργασίας. Η σχεδίαση και η τεχνική κατασκευής των κελυφών από πολυστερίνη κρίνεται, έπειτα η προσαρμογή του ψυκτικού και υδραυλικού κυκλώματος (εναλλάκτες, δοχείο αδρανείας, σωληνώσεις, αισθητήρια θερμοκρασίας και ροής) καθώς και της κατασκευής του συστήματος ενεργού αντιστάθμισης επέτυχαν το πρώτο και δεύτερο στόχο της εργασίας. Η χρήση υλικών, άμεσα προσβάσιμων, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επιδιόρθωση οποιουδήποτε λάθους στην σχεδίαση ή κακοτεχνίας. Η τεχνική γνώση και η εμπειρία που αποκομίστηκαν από την κατασκευή είναι ικανή να βοηθήσει στην περαιτέρω εξέλιξη της διάταξης αυτής. Επιπρόσθετα η σχεδίαση και υλοποίηση του ελεγκτή είχε σαν αποτέλεσμα την πλήρη εποπτεία όλων των συστημάτων και των μεταβολών τους ,ενώ έδινε το πλεονέκτημα προσαρμοστικότητας στις αλλαγές που απαιτήθηκαν κατά τη διάρκεια την κατασκευής. Η μεθοδολογία και οι ρουτίνες ελέγχου και επικοινωνίας που αναπτύχθηκαν σε αυτό το πλαίσιο καθώς και το υλικό (hardware) το οποίο μπορεί να λειτουργήσει για οποιαδήποτε παρόμοια διάταξη, δύναται να βοηθήσει στην ολοκλήρωση και άλλων παρόμοιων εργασιών. Έτσι ολοκληρώνεται κατά το ήμισυ και ο σκοπός της βαθμονόμησης.

Η διενέργεια της βαθμονόμησης και εν γένει των μετρήσεων απασχόλησε μεγάλο μέρος αυτής της εργασίας. Η ορθή λειτουργία όλων των συστημάτων και η επαναληπτικότητα των μετρούμενων μεγεθών βοήθησε στην επίρρωση της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Με την αντιμετώπιση σχεδιαστικών λαθών που εμφανίστηκαν και αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, δημιουργήθηκε η βάση για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας τόσο σε αυτό το εύρος ισχύος που κάλυψε η εργασία όσο και σε διαφορετικό. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ήταν ικανοποιητικά και αποκάλυψαν πως η σχεδίαση και η αρχική στόχευση έχει πετύχει το σκοπό της.Εντούτοις αποκάλυψαν και αδυναμίες που προκύπτουν από το τρόπο ελέγχου του εξοπλισμού ψύξης και κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου καθώς και τις επίδρασης εξωγενών παραγόντων όπως είναι η θερμοκρασία του γώρου,τα οποία μερικώς αντιμετωπίστηκαν.Από τις δοκιμές προκύπτει λοιπόν ότι η θερμιδομετρική διάταξη διπλού κελύφους βαθμονομήθηκε και διαπιστώθηκε ότι στο εύρος 20-55W παρουσιάζει ακρίβεια στη μέτρηση <5% ολοκληρώνοντας έτσι το σκοπό της βαθμονόμησης. Τέλος έγινε προσπάθεια για την θερμική μελέτη της διάταξης και την εξαγωγή μέσω προσομοίωσης των θερμικών χαρακτηριστικών του RC ισοδυνάμου κυκλώματος.Η εμπλοκή όλων των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας καθιστά δύσκολο το έργο της μοντελοποίησης και του γαρακτηρισμού των επιμέρους συστημάτων.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη της διάταξης

- Η χρησιμοποίηση αισθητηρίων υψηλότερης ακρίβειας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και ο έλεγχος των μονάδων Peltier με αναλογικό - ολοκληρωτικό ελεγκτή, θα εξαλείψει τις διακυμάνσεις σε μεγάλο βαθμό και θα προσδώσει στο σύστημα στοιβαρότητα και προσαρμοστικότητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές του χώρου.
- Η ανάπτυξη λογισμικού και διεπαφής για την απομακρυσμένη παρακολούθηση και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας έτσι ώστε να μειωθεί τεχνητά ο χρόνος των δοκιμών. Επίσης λόγω της κατασκευής της η διάταξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει εάν ελεγχόμενο θερμικά περιβάλλον δοκιμής μετατροπέων ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες.
- Η χρήση νευρωνικών δικτύων και προσαρμοστικών φίλτρων για την εξαγωγή γενικών και επιμέρους χαρακτηριστικών και η μοντελοποίηση της.

 Η εξέταση της δυνατότητας διττού ρόλου της διάταξης για τη χρήση της ως θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας μέτρησης απωλειών στη θερμική ισορροπία και επιπλέον χρήση της και για την διενέργεια μετρήσεων στο μεταβατικό στάδιο.